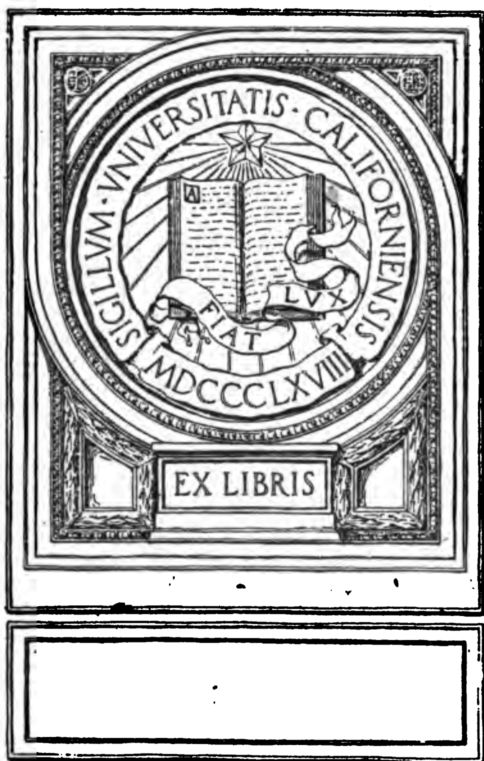

NRLF
276 466


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
FIAT LVX
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS



Nouvelle Collection scientifique
Directeur : Émile Borel

Le Froid industriel

PAR

L. MARCHIS
Professeur à la Faculté des sciences de Paris.

AVEC 104 FIGURES



LIBRAIRIE FÉLIX ALCAN

Le

Froid Industriel

LE FROID INDUSTRIEL

PAR

L. MARCHIS
Professeur à la Faculté des Sciences
de Paris.

AVEC 104 FIGURES DANS LE TEXTE



LIBRAIRIE FÉLIX ALCAN
1913

LE
FROID INDUSTRIEL

INTRODUCTION

L'APPLICATION CORRECTE DU FROID A LA CONSERVATION DES DENRÉES PÉRISSABLES

1. — **Le succès d'une installation frigorifique dépend de l'application de certaines règles fondamentales.** — L'industrie frigorifique, née en France avec les travaux de Charles Tellier, ne s'est véritablement développée qu'en Allemagne, en Angleterre et aux Etats-Unis. La défaveur, dont elle est encore frappée chez nous, tient en partie aux erreurs commises dans l'application des règles qui régissent la conservation des denrées périssables, lorsque celles-ci sont soumises à l'action de températures qui ne dépassent pas 20° C. au-dessous de zéro, et qui sont le plus souvent voisines de cette dernière température. Nous nous proposons, au début de cet ouvrage, d'insister sur ces règles fondamentales, dont l'application correcte peut seule conduire au succès.

Nous venons d'indiquer les limites entre lesquelles oscillent les températures qu'utilise l'industrie du froid. La production des très basses températures nécessaires à la liquéfaction de l'air constitue un domaine spécial, dans lequel nous ne croyons pas devoir entrer dans le cours de cet ouvrage.

2. — Liquides dont l'évaporation est une source industrielle de froid. — L'utilisation de la chaleur absorbée dans l'évaporation d'un liquide est actuellement la source industrielle du froid. On s'est longtemps adressé uniquement aux liquides possédant une grande tension de vapeur à la température ordinaire, tels que sont les gaz liquéfiés. Aujourd'hui, grâce aux beaux travaux de M. Maurice Leblanc sur la production du vide industriel, l'évaporation de l'eau est devenue une des sources industrielles du froid. En fait l'industriel s'adresse encore aux gaz liquéfiés et plus particulièrement à *l'ammoniaque*, à *l'anhydride sulfureux*, à *l'anhydride carbonique et au chlorure de méthyle.*

3. — Conditions que doit remplir un liquide dont l'évaporation est susceptible de produire les basses températures. — Le liquide, dont l'évaporation est utilisée à la production des basses températures, doit remplir certaines conditions, parmi lesquelles nous citerons :

a) La préparation industrielle dans un état convenable de pureté et dans des conditions suffisamment économiques ;

b) L'innocuité pour les ouvriers dans les manipulations soit à l'état de liquide, soit à l'état de vapeur;

c) L'aptitude à réaliser un grand abaissement de température des milieux intéressés par l'évaporation d'une faible masse; en d'autres termes, selon l'expression des physiciens, la propriété pour ce liquide d'avoir une grande chaleur de vaporisation.

Parmi les substances que nous avons citées plus haut, l'eau est assurément celle qui répond le mieux à ces conditions. Malheureusement, en raison de sa faible tension de vapeur à la température ordinaire, elle exige pour sa vaporisation des appareils spéciaux, qui actuellement ne répondent pas encore à tous les desiderata de l'industrie frigorifique. C'est pourquoi celle-ci utilise les autres liquides cités plus haut, et plus particulièrement l'ammoniaque et l'anhydride carbonique.

4. — **Types des machines à froid.** — L'aspiration des vapeurs émises par ces liquides se fait, soit au moyen d'une *pompe à gaz à piston*, soit au moyen d'un *éjecteur de vapeur*, soit enfin en utilisant les propriétés qu'ont certaines de ces vapeurs, telles que les *vapeurs d'ammoniaque*, de se *dissoudre dans l'eau*.

Les premières installations, comprenant une pompe, sont dites à *compression ;* les secondes sont dites à *éjection;* les dernières reçoivent plus particulièrement le nom de *machines à absorption*.

5. — Machines frigorifiques à compression. — Dans la *machine à compression*, la pompe à gaz aspire les vapeurs d'anhydride carbonique par

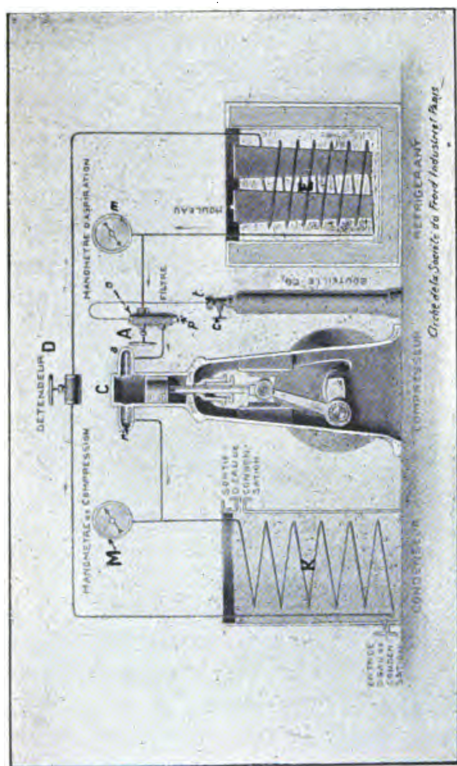


Fig 1. — Schéma d'une machine frigorifique à CO^2.

A, robinet d'aspiration pour le remplissage de la machine ; C, cylindre du compresseur ; D, détendeur ou valve de réglage ; E, serpentin de l'évaporateur ; K, serpentin du condenseur ; M, manomètre indiquant la pression dans le liquéfacteur ; *a*, soupape d'aspiration ; *c*, robinet de la bouteille à acide carbonique ; *m*, manomètre indiquant la pression dans l'évaporateur ; *o*, fixation du tuyau de remplissage sur le robinet d'aspiration ; *p*, purge de l'eau arrêtée sous forme de glace ; *r*, soupape de refoulement ; *t*, fixation du tuyau de remplissage sur la bouteille.

exemple, qui se trouvent au-dessus de ce gaz liquéfié contenu dans un récipient appelé *évaporateur* ou *réfrigérant* (fig. 1).

Ces vapeurs pénètrent dans la pompe au travers d'une soupape automatique, appelée *soupape d'aspiration*. Après avoir rempli le corps de pompe pendant toute une course de piston appelée *course d'aspiration*, ces vapeurs sont d'abord comprimées dans le corps de pompe durant la première partie de la course de retour du piston (course de compression). Puis, durant la deuxième partie de cette course, elles sont refoulées dans un récipient plongé dans un courant d'eau. Là elles passent à l'état liquide, parce que la tension acquise dans la pompe est égale à leur tension de vapeur correspondant à la température du récipient dans lequel elles sont refoulées. En raison de sa fonction, ce récipient reçoit le nom de *condenseur ou liquéfacteur*.

Le liquide ainsi obtenu revient enfin à l'évaporateur en passant au travers d'un robinet, la *vanne de réglage*.

L'aspiration des vapeurs dans l'évaporateur, suivie immédiatement d'une nouvelle vaporisation du liquide, produit une absorption de chaleur, capable d'abaisser la température d'un fluide, liquide ou gaz, répandu autour de l'évaporateur. D'où le nom de *réfrigérant* donné à cet organe et celui de *fluide frigorigène* donné au fluide, qui, après son évaporation, vient évoluer dans la pompe. Le milieu refroidi dans lequel plonge le réfrigérant peut être l'air d'une chambre de conservation de denrées ; on dit alors que l'installation de réfrigération est à *détente directe* (fig. 2). Ce milieu refroidi peut être une

solution saline incongelable (solution dans l'eau de chlorure de sodium, de chlorure de calcium,

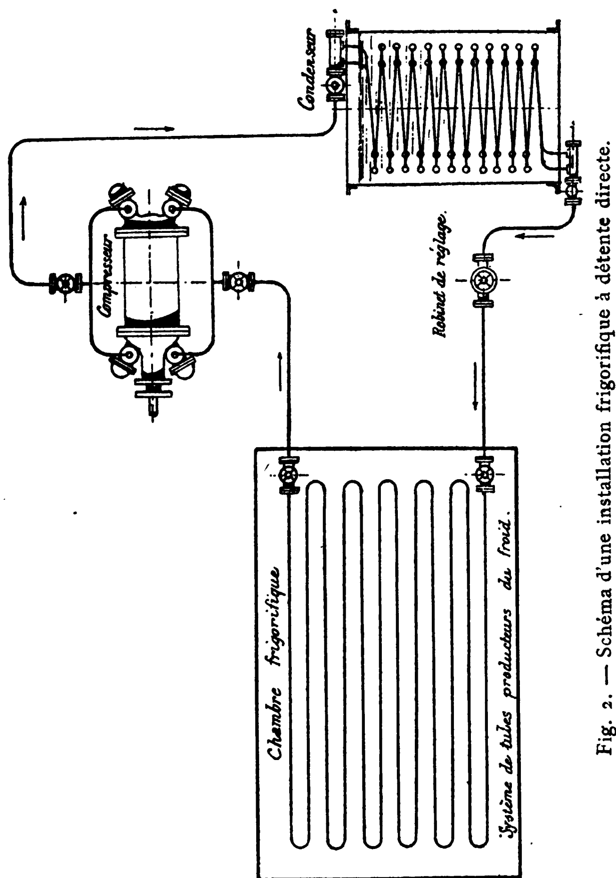


Fig. 2. — Schéma d'une installation frigorifique à détente directe.

de chlorure de magnésium) qui, au moyen d'une pompe, est envoyée dans des tuyaux capables

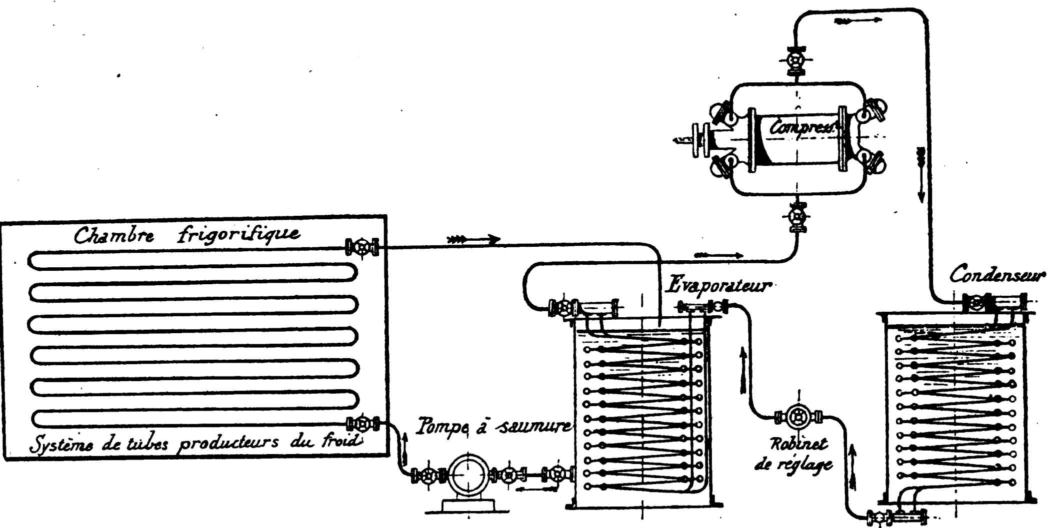


Fig. 3. — Schéma d'une installation frigorifique à circulation de saumure.

de réfrigérer à leur tour les chambres de conservation ; l'installation est alors dite à *circulation de saumure* (fig. 3).

En se condensant dans le liquéfacteur, le fluide frigorigène dégage de la chaleur ; celle-ci est absorbée par un courant d'eau que l'on fait circuler autour de cet organe maintenu à température constante.

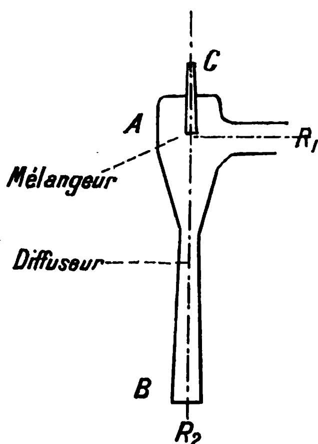


Fig. 4. — Schéma de tuyère.

AB, diffuseur ; A, mélangeur ; B, extrémité en relation avec un condenseur R_2 ; C, tuyère ; R_1, récipient dans lequel se fait l'évaporation du liquide frigorigène.

6. — Machine frigorifique à éjecteur. — La machine à éjecteur est fondée sur le principe suivant.

Un tuyau AB (fig. 4) rétréci en son milieu et présentant la forme générale d'un hyperboloïde de révolution à une nappe, débouche par une de ses extrémités B dans un condenseur R_2 ; son extrémité A est fermée par une paroi traversée par une *tuyère* C, dont l'axe se confond avec l'axe du tuyau AB appelé *diffuseur*. C'est à l'ensemble du diffuseur et de la tuyère que l'on donne le nom *d'éjecteur*. Au voisinage de la tuyère et latéralement, le diffuseur communique avec un réservoir R_1 dans lequel se trouve le liquide frigo-

rigène. Au travers de la tuyère C on lance un jet de vapeur avec une très grande vitesse. Ce jet de vapeur se précipite dans le diffuseur. Il entraîne

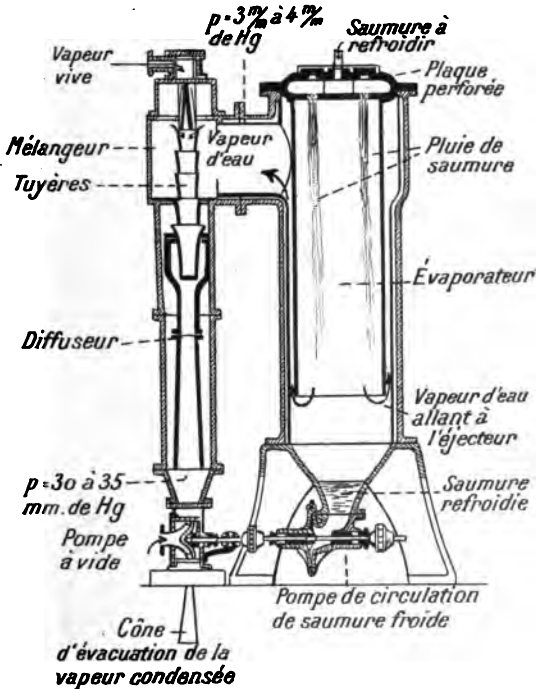


Fig. 5. — Schéma de la machine frigorifique à éjecteur de M. Maurice Leblanc (d'après le *Génie Civil*, 28 mai 1910).

par friction la vapeur du liquide frigorigène qui tend à affluer du réservoir R_1 dans la partie supérieure A du tuyau AB formant *mélangeur*. Par suite de l'entraînement du fluide frigorigène,

il y a évaporation du liquide contenu dans R_1 et par suite production de froid. Lorsque le régime permanent est établi, la tension de vapeur du liquide frigorigène dans le réservoir R_1 est une fraction de la pression maintenue dans le condenseur. Si, par exemple, la pression dans le condenseur R_2 est mesurée par 30 millimètres de mercure, la tension de vapeur dans l'évaporateur R_1 est dix fois moins grande ; elle est mesurée par une pression égale à 3 millimètres de mercure et la température du liquide frigorigène est celle qui correspond à cette tension.

Dans la machine Westinghouse-Leblanc (fig. 5), le liquide frigorigène est la dissolution saline incongelable, dont nous avons parlé plus haut. Refroidie directement par évaporation d'une partie de l'eau qu'elle contient, cette dissolution est envoyée par une pompe dans les canalisations de réfrigération des chambres de conservation des denrées alimentaires.

7. — **Machine frigorifique à absorption**. — Les *machines à absorption* sont des machines à ammoniaque. Elles comprennent, comme les machines à compression, un évaporateur et un liquéfacteur. L'évaporateur est mis en relation avec un récipient, dit *absorbeur ou saturateur*, contenant de l'eau à la température ordinaire. Les vapeurs d'ammoniaque passent de l'évaporateur dans l'absorbeur, s'y dissolvent dans l'eau. Il se fait une distillation de l'ammoniaque, distillation qui en abaisse la température. Quand la dissolution

ammoniacale est saturée, on la fait passer au moyen d'une pompe dans une chaudière. Là, par suite de l'élévation de température, la vapeur d'ammoniaque se dégage de la dissolution et va se condenser sous sa propre pression dans le liquéfacteur, d'où elle passe de nouveau par la vanne de réglage dans l'évaporateur.

Nous savons produire le Froid ; il faut maintenant l'utiliser.

8. — **Un bon isolement thermique est une des conditions nécessaires du succés d'une installation frigorifique.** — Le succès d'une installation de conservation des denrées par le froid dépend d'abord d'un bon isolement thermique des chambres de conservation. Il faut que celles-ci, une fois refroidies, ne tendent pas à se réchauffer trop rapidement par l'afflux de chaleur venant de l'extérieur. Comme nous allons le voir plus loin, les denrées ne se conservent avec leur valeur marchande que si, dans les chambres froides, elles sont maintenues, dans toutes leurs parties, à une température aussi constante que possible. La viande réfrigérée, par exemple, doit être maintenue dans les limites + 2 à + 4° C ; une chambre dans laquelle la température oscillerait entre — 4° C et + 6° C se trouverait dans de mauvaises conditions pour la conservation. Or, une telle constance de la température dans les diverses parties d'une chambre n'est possible que si celle-ci est convenablement isolée. Mais un isolement bien établi, avec des matériaux de bonne qualité, coûte en général fort cher. C'est pourquoi dans le but de

ne pas perdre une affaire, on traite parfois légèrement la question de l'isolement : une belle salle des machines tend à compenser un isolement défectueux.

Il y a là une erreur qu'il convient de signaler aux usagers de l'Industrie Frigorifique. Un bon isolement ne permet pas seulement de réduire la puissance des machines à froid et de faire des économies sur leur fonctionnement, il est encore indispensable pour empêcher les faibles oscillations de la température, condition essentielle d'une bonne conservation. Il convient d'ailleurs d'ajouter que cet isolement ne souffre pas la médiocrité ; il doit être établi par des spécialistes avec le plus grand soin. Une telle construction isolante nécessite parfois des dépenses assez fortes de première installation ; mais toute économie mal comprise peut avoir dans la suite une influence néfaste sur le succès de l'entreprise frigorifique. Supposons par exemple, l'isolement fait sans des soins spéciaux avec des matériaux peu coûteux, qui viennent à fermenter. Les mauvaises odeurs, qui se répandent dans les chambres, compromettent la conservation des denrées, et nécessitent une réfection beaucoup plus dispendieuse que ne l'eût été une installation initiale bien soignée.

A cette condition primordiale du succès d'une entreprise frigorifique, il convient d'en ajouter d'autres relatives à la qualité des denrées soumises à l'action du froid, à leur traitement, à leur mode d'introduction dans les chambres froides, à leur sortie de ces chambres.

9. — Les denrées soumises à l'action du froid doivent être en excellent état. — *Il ne faut soumettre à l'action des basses températures que des denrées en bon état de conservation.* Contrairement à une opinion encore trop répandue, le *froid ne bonifie pas les denrées* [1] : il ralentit beaucoup les transformations qui donnent naissance à la décomposition ; mais il ne les supprime pas entièrement. Une denrée, qui entre avariée dans une chambre froide, en sort au bout d'un certain temps dans un état de décomposition plus grand ; son séjour n'a jamais pour effet d'améliorer sa qualité. Ramenée à la température ordinaire, cette denrée continue à s'avarier. On dit couramment que les denrées, soumises à l'action du froid, ont une tendance plus nette à se décomposer aussitôt après leur sortie des chambres froides. C'est là encore une de ces légendes accréditées par des détracteurs intéressés de l'industrie frigorifique. Une denrée saine, maintenue pendant un temps convenable à une basse température choisie à cet effet, subit certainement une transformation lente, qui dans certaines limites est parfois favorable à sa valeur marchande [2] : mais lorsqu'elle est ramenée à la

1. L'action des basses températures entrave le développement des microbes, mais ne les tue pas ; certains d'entre eux résistent à des températures de 180 degrés au-dessous de zéro. Aux basses températures de congélation (— 10° ou — 15°), l'activité microbienne est très ralentie et dans certains cas pratiquement nulle. Mais, aux températures ordinaires des chambres froides (— 2° à + 4°), cette activité est sensible.

2. Au sortir de la halle d'abattage, la viande maintenue pendant quelques jours au voisinage de zéro dans une atmosphère suffisam-

température ordinaire, cette transformation se continue avec une vitesse, qui n'est pas augmentée par suite du séjour aux basses températures. Une denrée qui, au sortir d'une chambre froide subit une décomposition rapide, a été introduite dans un état d'avarie correspondant à son nouvel aspect. La réfrigération n'est pas l'adjuvant d'une détérioration plus rapide des denrées soustraites à son action ; mais elle n'est pas non plus en général un agent de bonification.

10. — Le succès de la conservation par le froid dépend de la température des chambres et de leur état hygrométrique. — Le succès de la conservation par le froid dépend encore pour chaque denrée de la *température des chambres et de leur état hygrométrique*. Les valeurs de celles-ci qui caractérisent les modes de traitement, doivent être maintenues aussi constantes que possible dans toute l'étendue du local d'emmagasinement. Ce sont des essais répétés qui seuls permettent aux usagers de l'Industrie Frigorifique de connaître ces conditions optima de température et d'état hygrométrique. Grâce à elles, non seulement le produit est, au point de vue de l'hygiène, en bon état de conservation, mais encore il présente l'apparence extérieure habituelle de la fraîcheur.

11. — L'air des chambres doit être aseptique. Renouvellement de cet air. — Pour arriver à ce but, il

ment sèche subit la transformation dite du *rassiement* qui augmente ses qualités au point de vue de la consommation.

ne suffit pas que l'atmosphère de la chambre froide se trouve dans des conditions convenables de température et d'état hygrométrique, il est encore indispensable qu'elle *soit suffisamment aseptique*. Elle ne doit pas être contaminée par les odeurs de produits autres que celui ordinairement conservé dans cette chambre. En d'autres termes, il est bon de ne faire servir les locaux de conservation qu'à un seul usage; en particulier, il serait déplorable de conserver dans une même chambre de la viande à côté de produits de laiterie. De plus, même quand on n'emmagasine qu'un seul produit dans un local, il faut renouveler plusieurs fois par jour l'air de celui-ci. Il convient enfin de le munir d'ouvertures communiquant avec l'air extérieur et permettant une abondante aération durant les jours secs et froids de l'hiver. Nous n'avons pas besoin d'ajouter que la propreté la plus méticuleuse doit régner dans les chambres froides, et que les ouvriers ne doivent, autant que possible, y entrer qu'avec des vêtements propres.

12. —L'entrée et la sortie des chambres froides doivent être progressives, mais non brusques. — Enfin, les modes d'entrée et de sortie des chambres de conservation doivent être aussi l'objet de précautions spéciales. Il faut que le refroidissement et le réchauffement se fassent progressivement et non d'une manière brusque. L'abaissement trop rapide de la température d'un produit, engendre des détériorations dans les tissus, causes d'une plus grande vitesse d'infection ; le passage trop

rapide des denrées froides à la température des jours d'été (à état hygrométrique élevé), provoque à la surface de celles-ci des dépôts d'humidité, véhicules normaux des microbes de la décomposition.

13. — Plan de l'ouvrage. — Nous ne ferons pas dans cet ouvrage l'application de ces règles à toutes les sortes de denrées ; nous étudierons seulement quelques exemples caractéristiques.

Nous n'explorerons même pas tout le domaine de l'Industrie Frigorifique. Nous étudierons plus spécialement l'entrepôt frigorifique pour toutes denrées et nous appliquerons les principes donnés dans cette étude au frigorifique d'abattoir et au frigorifique de pêche.

Le plan que nous suivrons sera d'ailleurs le suivant.

PREMIÈRE PARTIE. — *Production du Froid.* Etude des divers types de machines frigorifiques et des conditions de leur fonctionnement.

DEUXIÈME PARTIE. — *Conservation du Froid.* Propriétés et emploi des divers isolants thermiques : conditions qu'ils doivent remplir pour l'industrie frigorifique.

Construction et aménagement d'un entrepôt frigorifique : son mode de fonctionnement.

TROISIÈME PARTIE. — *Applications du Froid.* Etude de la fabrication de la glace et de la conservation de la viande et du poisson : les frigorifiques d'abattoirs et les frigorifiques de pêche.

CHAPITRE PREMIER

LA MACHINE FRIGORIFIQUE A COMPRESSION

§ 1. — Puissance frigorifique et rendement.

1. — Rappel du fonctionnement des machines à compression. — Comme nous venons de le voir dans l'Introduction, la machine frigorifique à compression se compose essentiellement d'un compresseur, qui aspire les vapeurs d'un fluide frigorigène contenu dans l'évaporateur et les refoule pour les faire passer à l'état liquide dans le liquéfacteur : ce liquide revient ensuite à l'évaporateur en traversant la vanne de réglage. On voit donc que, théoriquement du moins, une même quantité de fluide évolue constamment de l'évaporateur au liquéfacteur et vice versa.

2. — Calorie et Frigorie. — Ces transformations sont accompagnées de dégagements et d'absorptions de chaleur, parmi lesquelles il faut distinguer plus particulièrement :

a) La quantité de chaleur absorbée dans l'évaporateur par la vaporisation du fluide frigorigène ;

b) La quantité de chaleur dégagée dans le liquéfacteur durant la condensation du fluide frigorigène.

La première quantité de chaleur représente *l'effet utile* de la machine. On l'exprime généralement en *calories-kilogramme*, la calorie-kilogramme étant la quantité de chaleur absorbée pour élever de 1° la température de 1 kilogramme d'eau. A la température de 0° par exemple, la vaporisation de 1 kilogramme d'ammoniaque liquide absorbe 305 calories-kilogramme. Au lieu de dire que la vaporisation d'un liquide absorbe de la chaleur, on dit aussi qu'elle produit du froid; 1 kilogramme d'ammoniaque liquide, en se vaporisant à 0°, fournit au milieu qui entoure l'évaporateur 305 frigories-kilogramme.

La quantité de chaleur dégagée dans le liquéfacteur doit être absorbée par l'eau que l'on fait circuler autour de lui; sa connaissance est donc importante à connaître pour l'industriel.

3. — Puissance effective et puissance indiquée à fournir au compresseur. Rendement mécanique du compresseur. — Pour faire fonctionner le compresseur, il est nécessaire de lui fournir du travail ou de la puissance. La puissance dépensée sur l'arbre du compresseur s'appelle *la puissance effective qu'il faut rendre disponible sur cet arbre*.

Si les organes mécaniques du compresseur se mouvaient sans frottement, la puissance dont nous venons de parler serait égale à la puissance nécessaire pour effectuer les transformations du

fluide dans le compresseur; cette dernière puissance reçoit le nom de *puissance indiquée à fournir au compresseur*[1]. En réalité, à cause des frottements du mécanisme la puissance indiquée *est inférieure à* la puissance effective à fournir au compresseur; le rapport entre ces deux puissances ou *rendement mécanique du compresseur*, est compris, pour les machines à froid, entre 86 p. 100 et 94 p. 100.

4. — Rendement effectif et rendement indiqué. — Il est intéressant pour l'industriel de connaître la puissance effective qu'il doit fournir au compresseur pour obtenir la production d'une frigorie-kilogramme dans le milieu qui entoure l'évaporateur — ou bien le nombre de frigories-kilogramme produites par unité de puissance ou de travail dépensé sur l'arbre. Les nombres ainsi obtenus caractérisent le *rendement effectif* de la machine. On dit qu'une machine à froid produit 3.000 frigories par cheval-heure dépensé sur l'arbre du compresseur[2].

Au lieu de rapporter la production des frigories au cheval-heure dépensé sur l'arbre, on peut la rapporter au cheval-heure nécessaire pour opérer les transformations du fluide à l'intérieur de la machine. Ce travail, ou *cheval-heure*

1. Nous verrons plus loin d'où vient la dénomination de puissance indiquée.

2. Le cheval-heure représente le travail produit par une machine d'une puissance de un cheval (75 kilogrammètres par seconde) fonctionnant durant une heure; cette unité vaut $75 \times 3.600 = 270.000$ kilogrammètres.

indiqué, est égal au cheval-heure effectivement dépensé sur l'arbre divisé par le rendement mécanique. Si une machine produit 3.000 frigories par cheval-heure dépensé sur l'arbre du compresseur, et si le rendement mécanique du compresseur est égal à 90 p. 100, la production de frigories par cheval-heure indiqué est égale à

$$\frac{3.000}{0,90} = \mathbf{3.333} \text{ environ.}$$

Le rendement ainsi exprimé est le *rendement indiqué.*

5. — Puissance frigorifique d'une machine. — Le nombre de frigories qu'une machine est capable de fournir par heure s'appelle *la puissance frigorifique de la machine*. On l'exprime en *frigories-heure ;* on dit qu'une machine à froid a une puissance de 120.000 frigories-heure. On compte dans l'industrie qu'il faut produire en moyenne 120 frigories pour obtenir 1 kilogramme de glace. Une machine d'une puissance égale à 120.000 frigories-heure est donc capable de produire 1 tonne de glace par heure.

6. — Transformation du fluide frigorigène à l'intérieur d'une machine à froid idéale. — Ces définitions étant données, étudions les transformations du fluide frigorigène à l'intérieur d'une machine à froid idéale. Nous nous rendrons compte ainsi des facteurs qui influent sur la valeur du rendement indiqué.

Prenons dans l'évaporateur un poids déterminé,

100 grammes par exemple, de fluide frigorigène constitué par de l'ammoniaque, par exemple. Pendant un tour de l'arbre il passe à l'intérieur de la machine par la série des transformations suivantes.

1° Durant une course du piston[1], les 100 grammes d'ammoniaque emplissent le corps de pompe d'un mélange de vapeurs saturées d'ammoniaque et d'un nuage de gouttelettes d'ammoniaque liquide à la température centigrade t_1 (— 10° par exemple) du liquide de l'évaporateur ; la pression de ce mélange est égale à la tension de vapeur saturée de l'ammoniaque à la température t_1 (2^{kgr},9 par centimètre carré). La vaporisation partielle qui caractérise cette transformation est accompagnée d'une absorption de Q_1 calories-kilogramme ou d'une production de Q_1 frigories-kilogramme (313 calories par kilogramme de liquide vaporisé à la température de — 10° C.)

2° Le piston revient en sens inverse et, dans la première partie d'une seconde course, comprime le mélange précédent jusqu'à ce qu'il prenne la tension de vapeur saturée de l'ammoniaque liquide à la température centigrade t_2, qui règne dans le liquéfacteur (10 kilogrammes par centimètre carré à la température de + 24° C.). Supposons que cette compression se fasse sans que le fluide cède de la chaleur aux parois du compresseur ou en reçoive ; en d'autres termes, supposons que cette compression soit *adiabatique*.

1. Nous supposons le compresseur à simple effet, c'est-à-dire aspirant et refoulant d'un seul côté du piston, l'autre face étant uniquement soumise à la pression de l'atmosphère.

3° Le piston continuant sa course de retour, le mélange se liquéfie en entier sous la tension de vapeur saturée définie plus haut. Ce passage à l'état liquide est accompagné d'un dégagement dans le liquéfacteur de Q_2 calories-kilogramme, qui sont absorbées par l'eau circulant autour de cette partie de la machine (280 calories par kilogramme de vapeur condensée à la température de + 24° C.).

4° Les 100 grammes de liquide ainsi obtenus sous la tension de vapeur saturée de l'ammoniaque à la température t_2 sont amenés, au moyen d'un cylindre, dans lequel s'opère une *détente adiabatique* c'est-à-dire sans échange de calories avec les parois du cylindre, à la température primitive t_1 sous la tension de vapeur saturée de l'ammoniaque à cette température.

7. — Cycle fermé parcouru par le mélange évoluant dans l'intérieur d'une machine frigorifique idéale. — Les 100 grammes d'ammoniaque liquide subissent les transformations que nous venons de définir ; celles-ci ramènent le fluide à l'état initial, lui faisant ainsi parcourir un *cycle fermé*.

Durant le parcours de ce cycle on doit fournir un certain travail indiqué représenté par un nombre $\mathcal{T}_i$ de kilogrammètres.

La thermodynamique nous apprend que ce travail $\mathcal{T}_i$ est égal au produit

$$425 (Q_2 - Q_1).$$

8. — Le cycle fermé parcouru est un cycle de Carnot. — Mais d'autre part le cycle précédent est carac-

térisé par ce fait que les 100 grammes d'ammoniaque n'échangent de chaleur avec les parois au contact desquelles ils se transforment, que lorsque ces 100 grammes de fluide sont à la température t_1 ou à la température t_2. Le cycle considéré est un *cycle de Carnot*.

Supposons que les transformations des 100 grammes de fluide que nous venons d'étudier puissent être effectuées en sens inverse. Le fluide, pris dans l'évaporateur est comprimé adiabatiquement jusqu'à la tension de vapeur de l'ammoniaque liquide correspondant à la température t_2 du liquéfacteur. Le liquide ainsi obtenu est transformé à la température t_2 dans le liquéfacteur en un mélange de vapeur et de liquide avec absorption de Q'_2 calories-kilogrammes. Ce mélange est détendu adiabatiquement dans le compresseur jusqu'à ce qu'il prenne la température t_1 de l'évaporateur et qu'il supporte la tension de vapeur correspondant à cette température. Enfin, ce mélange est liquéfié à la température t_1 dans l'évaporateur avec dégagement de Q'_1 calories-kilogrammes. Les 100 grammes d'ammoniaque ont, dans cette seconde série de transformations, parcouru un *cycle de Carnot inverse du précédent*.

9. — Le cycle fermé parcouru est un cycle de Carnot réversible. — Si les transformations qui constituent les deux cycles de Carnot inverses se font d'une *manière infiniment lente* et sont telles que les calories mises en jeu dans deux transformations inverses soient égales en valeur absolue (Q'_2 =

$- Q_2$; $Q'_1 = - Q_1$), le cycle de Carnot est dit *réversible*.

A ce cycle réversible, on peut appliquer le *théorème de Carnot*, à savoir que le rapport de la quantité de chaleur absorbée Q_1 au quotient $\frac{\mathfrak{T}_i}{425}$, c'est-à-dire le rendement du cycle, a pour expression

$$\frac{273 + t_1}{t_2 - t_1}.$$

En d'autres termes, si une machine frigorifique fonctionne suivant un cycle de Carnot réversible, son rendement indiqué ne dépend que des températures qui règnent dans l'évaporateur et dans le liquéfacteur. Si ces températures sont, par exemple, égales à — 10° C. et + 24° C., ce rendement a pour valeur

$$\frac{273 - 10}{24 + 10} = \mathbf{7,74} \text{ environ.}$$

Une telle machine produit 4.917 frigories par cheval-heure indiqué [1].

1. On a en effet les relations :

$$\mathfrak{T}_i = 425\,(Q_2 - Q_1)\,; \quad \frac{Q_2}{273 + t_2} = \frac{Q_1}{273 + t_1}$$

$$= \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} \text{ (théorème de Carnot).}$$

$$\text{Rendement} = \frac{Q_1}{\frac{\mathfrak{T}_i}{425}} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{273 + t_1}{t_2 - t_1}.$$

Comme un cheval-heure vaut 270.000 kilogrammètres, $\mathfrak{T}_i$ kilogrammètres valent $270.000 \times N_i$, N_i étant un certain nombre de chevaux-heure.

$$\text{Rendement} = \frac{Q_1}{N_i} = \frac{273 + t_1}{t_2 - t_1} \times \frac{270.000}{425}$$

Ici on a

$$7,74 \times \frac{270.000}{425} = \mathbf{4.917} \, \frac{\text{frigories}}{\text{cheval-heure}}$$

Le fonctionnement d'une machine à froid suivant un cycle de Carnot réversible n'est pas réalisable, même approximativement dans la pratique. Toutefois, la valeur du rendement est un maximum maximorum correspondant aux températures de l'évaporateur et du liquéfacteur.

10. — Une machine frigorifique ne fonctionne pas suivant un cycle de Carnot non réversible. — En réalité une machine frigorifique ne fonctionne même pas suivant un cycle de Carnot non réversible. Le fluide frigorigène se refroidit sous pression constante (tension de la vapeur saturée à la température de liquéfaction) dans le liquéfacteur ou dans un réfrigérant auxiliaire en communication avec lui; la quantité de chaleur dégagée, soit Q'_2, est absorbée par l'eau de circulation. Le fluide frigorigène refroidi jusqu'à une température t'_2 traverse la vanne de réglage; il se vaporise en partie en se refroidissant encore et revient finalement à son état initial dans l'évaporateur. Si les autres transformations du fluide sont les mêmes que dans le fonctionnement suivant un cycle de Carnot, le travail indiqué à fournir au compresseur est égal à

$$425\,(Q_2 + Q'_2 - Q_1).$$

Comme il est plus grand que dans le cas précédent, le rendement indiqué est moindre et le nombre de frigories produites par cheval-heure indiqué est plus faible qu'avec le moteur idéal fonctionnant suivant un cycle de Carnot réversible.

Donnons une idée de la valeur de ce rendement qui, pour les machines réelles, est vraiment la limite supérieure dont l'ingénieur cherche à s'approcher par un perfectionnement convenable du fonctionnement de la machine.

11. — Diagramme théorique d'une machine frigorifique à compression. — Prenons deux axes de coordonnées rectangulaires. Sur l'axe des abscisses portons, à partir de l'origine A_0 (fig. 6), des longueurs proportionnelles aux volumes balayés par le piston ; sur l'axe des ordonnées portons des longueurs proportionnelles aux pressions (en atmosphères ou kilogrammes par centimètre carré) que le fluide exerce sur le piston à l'intérieur du corps de pompe.

a) Durant la course d'aspiration, le fluide (ici l'ammoniaque) introduit dans le corps de pompe est à la pression qui règne dans l'évaporateur [2^{kg},9 par centimètre carré, si le liquide de l'évaporateur est à la température de — 10° C.]. Les points représentatifs de la pression de ce fluide sont sur une droite AB parallèle à l'axe des abscisses et d'ordonnée égale à 2,9.

b) Durant la course de compression adiabatique (première partie de la course de retour du piston), la pression du fluide est représentée par les points d'une courbe BC. A la fin de la compression, l'ordonnée du point C est égale à la tension de vapeur saturée correspondant à la température qui règne dans le liquéfacteur [10 kilogrammes par centimètre carré, si cette température est égale à + 24° C.]. Quant au volume occupé par

le fluide, il est différent suivant que celui-ci est encore saturé à la fin de la compression ou suivant qu'il est surchauffé.

c) Durant la deuxième partie de la course de retour du piston (refoulement dans le liquéfacteur), la pression du fluide reste égale à la tension

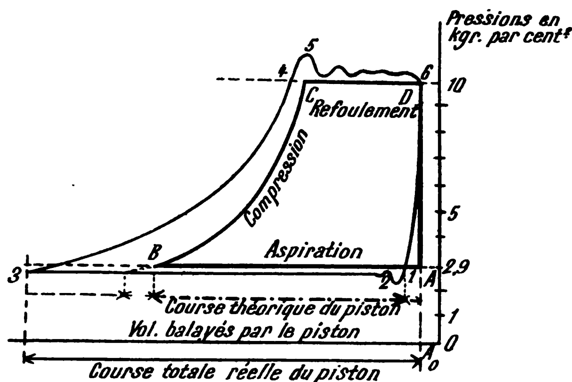


Fig. 6. — Diagramme théorique A, B, C, D, et diagramme réel 1, 2, 3, 4, 5, 6, d'une machine frigorifique.

1, ouverture de la soupape d'aspiration ; 1, 2, dépression à l'aspiration (début) ; 2, 3, aspiration ; 3, 4, 5, compression ; 5, ouverture de la soupape de refoulement ; 5, 6, refoulement ; 6, 1, détente dans l'espace nuisible.

de la vapeur saturée de l'ammoniaque dans le liquéfacteur. Les points représentatifs de l'état du fluide se trouvent sur une droite CD parallèle à l'axe des abscisses, dont l'ordonnée est égale à 10.

Le contour ABCDA (fig. 6) est le *diagramme du fonctionnement de la machine*. Si le fluide est saturé à la fin de la compression, le fonctionnement est dit en *régime humide ;* si le fluide

est surchauffé à la fin de la compression, le fonctionnement est dit en *régime sec.*

On démontre que, si le compresseur est à simple effet (ce que nous supposons ici), le travail indiqué fourni par tour au compresseur est représenté par l'aire enfermée par le diagramme ABCDA. Lorsqu'on connaît l'équation de la courbe de compression adiabatique BC, les méthodes de la géométrie permettent de calculer ce travail.

12. — Rendement théorique de la machine frigorifique. — Le rendement de la machine à froid est alors connu. Il est une fonction non seulement des températures d'évaporation et de condensation du liquide frigorigène, mais encore de la température de ce liquide avant son passage au travers de la vanne de réglage. Nous avons vu plus haut que, pour une machine idéale fonctionnant suivant un cycle de Carnot réversible, ce rendement est indépendant de la nature du fluide qui subit des transformations. Il n'en est plus forcément ainsi pour la machine parfaite que nous étudions maintenant. En fait, ce rendement indiqué est peu différent, que le fluide frigorigène soit de l'ammoniaque, de l'anhydride sulfureux ou de l'anhydride carbonique.

13. — Calcul du rendement théorique d'une machine à ammoniaque. — Proposons-nous de calculer ce rendement d'une machine parfaite à ammoniaque, dont le fonctionnement est caractérisé par les températures suivantes :

Température correspondant à la tension de vapeur saturée dans l'évaporateur . . . . $= -$ **10**° C.
Température correspondant à la tension de vapeur saturée au moment de la liquéfaction du fluide frigorigène . . . . $= +$ **24**° C.
Température du fluide frigorigène avant la vanne de réglage . . . . $= +$ **11**° C.

Admettons d'autre part que la machine frigorifique fonctionne en régime sec, qu'à la fin de la course d'aspiration le compresseur soit rempli de vapeur saturée et sèche.

Considérons 1 kilogramme d'un mélange d'ammoniaque liquide et de vapeur saturée d'ammoniaque à — 10° C.; ce mélange contient 95 p. 100 de liquide et 5 p. 100 de vapeur. A la fin de la course d'aspiration, il est transformé en vapeur saturée à — 10° C. La quantité de chaleur Q_1 absorbée dans cette transformation est égale à

$$0{,}95 \times 313 = \mathbf{297{,}35} \text{ cal. kg.}$$

A la température de — 10° C. le volume de 1 kilogramme de vapeur saturée d'ammoniaque est égal à

$$0^{m^3}{,}425$$

La quantité de chaleur absorbée par mètre cube du volume balayé par le piston dans le compresseur est donc

$$\frac{297{,}35}{0{,}425} = \mathbf{700} \ \frac{\text{cal.-kg.}}{\text{m}^3}.$$

L'équation de la courbe de compression étant connue, le calcul de l'aire limitée par le dia-

gramme ABCDA (fig. 6), montre que le travail indiqué qu'il faut fournir au compresseur est, par mètre cube du volume balayé par le piston, égal à 41.746 kilogrammètres.

Le rendement indiqué a pour valeur

$$\frac{700}{\frac{41.746}{425}} = \mathbf{7,12}.$$

Le nombre de frigories produites par cheval-heure indiqué est

$$7,12 \times \frac{270.000}{425} = \text{environ } \mathbf{4.521} \ \frac{\text{frigories}}{\text{ch.-h. indiqué}}.$$

La quantité de chaleur dégagée au liquéfacteur par mètre cube du volume balayé par le piston est

$$\frac{41.746}{425} + 700 = \mathbf{798,22} \ \frac{\text{cal.-kg.}}{\text{m}^3}.$$

Cette quantité de chaleur est absorbée par l'eau de circulation. Si celle-ci entre à la température de + 10° et sort à + 20°, le nombre de litres d'eau qu'il faut faire circuler autour du liquéfacteur pour absorber la quantité de chaleur précédente est

$$\frac{798,22}{20 - 10} = \mathbf{80} \text{ litres environ.}$$

Lorsque, durant la rotation du compresseur à ammoniaque, le piston balaie un volume égal à un mètre cube, le nombre de frigories produites à l'évaporateur est, nous venons de le voir, égal à 700. Une machine capable de produire

100.000 frigories par heure, c'est-à-dire dont la puissance frigorifique est égale à 100.000 frigories-heure, doit avoir un volume de compresseur tel que le piston balaie par heure

$$\frac{100.000}{700} = \mathbf{143} \text{ mètres cubes environ.}$$

Si le compresseur fait 50 tours par minute ou 3.000 tours à l'heure, il doit avoir un volume égal à

$$\frac{143}{3\,000} = \mathbf{0^{m^3},048} \text{ environ.}$$

Prenons une course de piston égale à $0^m,45$, la section d'un compresseur à double effet (agissant par les deux faces du piston) sera égale à

$$\frac{0,048}{2 \times 0,45} = \mathbf{0^{m^2},0533}.$$

Le diamètre de ce compresseur sera égal à 260 millimètres.

Nous avons fait le calcul précédent pour un compresseur à ammoniaque. Reprenons-le pour un compresseur à anhydride sulfureux et pour un compresseur à anhydride carbonique, fonctionnant l'un et l'autre dans les mêmes conditions de température que précédemment. Nous obtenons les résultats suivants :

Nombre de frigories produites dans l'évaporateur par mètre cube du volume balayé par le piston du compresseur :

Compresseur à ammoniaque . . . . $\frac{297,35}{0,425} = \mathbf{700}.$

Compresseur à anhydride sulfureux . . $\frac{93,6 \times 0,95}{0,330} = \frac{88,92}{0,33} = \mathbf{270}.$

Compresseur à anhydride carbonique. $\frac{61,2 \times 0,95}{0,0143} = \frac{58,14}{0,0143} = \mathbf{4.066}$.

Volume balayé en une heure par le piston d'une machine de 100.000 frigories-heure :

Compresseur à ammoniaque . . . . $\frac{100.000}{700} = \mathbf{144}$ m^3.

Compresseur à anhydride sulfureux. . $\frac{100.000}{270} = \mathbf{372}$ m^3.

Compresseur à anhydride carbonique. $\frac{100.000}{4.066} = \mathbf{24}$ m^3.

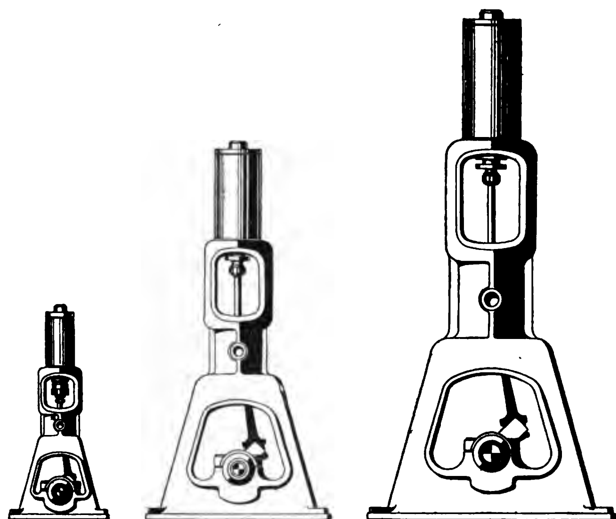
14. — Rapports des volumes des compresseurs à ammoniaque, à anhydride sulfureux, à anhydride carbonique. — Si on prend comme unité le volume du compresseur à anhydride carbonique, les volumes des autres compresseurs se rangent par ordre de grandeur de la manière suivante :

Compresseur à anhydride carbonique . .	**1**
Compresseur à ammoniaque	**6**
Compresseur à anhydride sulfurique. . .	**15,50**

Des trois types de machines frigorifiques à compression employés le plus ordinairement dans l'industrie, les compresseurs à anhydride carbonique ont le moindre encombrement, puis viennent les compresseurs à ammoniaque, enfin les compresseurs à anhydride sulfureux (fig. 7). Aussi faut-il s'attendre à voir les premiers avoir la préférence dans toutes les installations, où la place de la machine à froid est limitée ; par exemple, dans les navires frigorifiques.

15. — Comparaison entre les rendements théoriques des machines à froid. — Comparons de même les

rendements de ces trois types de compresseurs en calculant les frigories produites par cheval-heure indiqué.



Acide carbonique. **Ammoniaque.** **Anhydride sulfureux.**

Fig. 7. — Grandeurs comparées des machines frigorifiques (Cliché de la *Société Française d'Installations Frigorifiques*).

Nombre de chevaux-heure indiqués à fournir à un compresseur par mètre cube du volume balayé par le piston :

Compresseur à ammoniaque. $\frac{417.46}{270.000}$ = **0,154**.

Compresseur à anhydride sulfureux . . . . $\frac{15.660}{270.000}$ = **0,058**.

Compresseur à anhydride carbonique . . . . $\frac{272.160}{270.000}$ = **1,008**.

Nombre de chevaux-heure indiqués à fournir à un compresseur de 100.000 frigories-heure :

Compresseur à ammoniaque.	$0,154 \times 144 =$ **22,2.**
Compresseur à anhydride sulfureux	$0,058 \times 372 =$ **21,6.**
Compresseur à anhydride carbonique	$1,008 \times 24 =$ **24,2.**

Nombre de frigories produites par cheval-heure indiqué :

Compresseur à ammoniaque.	$\frac{100.000}{22,2} =$ **4.520** environ.
Compresseur à anhydride sulfureux.	$\frac{100.000}{21,6} =$ **4.629** environ.
Compresseur à anhydride carbonique	$\frac{100.000}{24,2} =$ **4.132** environ.

Si on prend comme unité le rendement du compresseur à anhydride carbonique, on voit que les rendements des autres compresseurs ont les valeurs suivantes :

Compresseur à anhydride carbonique. . .	**1,00**
Compresseur à ammoniaque	**1,09**
Compresseur à anhydride sulfureux. . . .	**1,12**

Au point de vue théorique, pour les machines à compression usuelles fonctionnant dans les mêmes conditions, le rendement est sensiblement le même.

16. — Rendements indiqués réels des machines frigorifiques. — Les rendements indiqués que nous venons de donner sont supérieurs aux rendements des machines frigorifiques réelles. Ceux-ci ne dépassent pas 4.000 frigories par cheval-heure indiqué pour les meilleures machines fonctionnant

dans les conditions favorables d'un essai de réception. En marche industrielle on produit au plus 3.000 à 3.200 frigories par cheval-heure indiqué.

Cette différence entre le rendement indiqué théorique et le rendement indiqué réel tient aux conditions dans lesquelles fonctionne un compresseur industriel.

17. — Rôle de l'espace nuisible. — Dans ce qui précède nous avons supposé qu'au début de la course d'aspiration la base du piston s'appuyait exactement sur la paroi du corps de pompe. Dès que le piston commençait sa course d'aspiration, du fluide frigorigène passait de l'évaporateur dans le compresseur ; la production des frigories dans l'évaporateur se produisait dès le début de l'aspiration. En réalité, il n'en est pas ainsi. Lorsque le piston est à fond de course, il existe nécessairement un espace compris entre la base du piston et la face opposée du corps de pompe ; on donne à celui-ci le nom d'*espace nuisible*. Cet espace est rempli de liquide frigorigène, provenant du refoulement au compresseur effectué dans la course précédente. Au début de l'aspiration, lorsque le piston se déplace en faisant le vide derrière lui, le liquide frigorigène de l'espace nuisible se vaporise d'abord. Dans le corps de pompe s'exerce une pression qui, diminuant de valeur à partir de celle de la pression de refoulement, empêche d'ouvrir la soupape d'aspiration *automatique*. Durant ce mouvement du piston, il ne se produit donc pas d'évaporation du fluide

frigorigène contenu dans l'évaporateur. Le fonctionnement du compresseur se fait en pure perte, sans production de frigories utiles, c'est-à-dire de frigories dans l'évaporateur. Il y a donc intérêt à donner au compresseur et au piston une forme permettant de réduire autant que possible l'espace nuisible. Nous verrons plus loin comment on réalise cette condition.

18. — Effet de la dépression à l'aspiration. — Dans le fonctionnement théorique d'un compresseur nous avons supposé que la pression du fluide frigorigène derrière le piston était égale à la tension de la vapeur saturée de ce fluide à la température régnant dans l'évaporateur. Il n'en est pas ainsi dans le fonctionnement réel. La soupape d'aspiration automatique est maintenue fermée par la résistance d'un ressort; pour que cette soupape s'ouvre et laisse pénétrer le fluide frigorigène dans le compresseur, il est nécessaire que la pression dans celui-ci devienne inférieure à la tension de vapeur saturée dans l'évaporateur. Il faut créer ce qu'on appelle la *Dépression à l'aspiration*. Lorsque la soupape d'aspiration est ouverte, le fluide frigorigène ne peut pénétrer dans le compresseur que si, dans ce dernier, la dépression est capable de vaincre la résistance du ressort et celle que le fluide éprouve dans son mouvement soit à l'intérieur des tuyauteries, soit au passage de l'ouverture d'aspiration. Durant toute la période d'aspiration, la pression dans le compresseur est donc inférieure à celle que nous avons admise dans le fonctionnement théorique.

De là résulte un accroissement de la puissance à fournir au compresseur.

19. — Effet de la surpression au refoulement. — De même, au moment du refoulement dans le liquéfacteur, la pression dans le compresseur doit être supérieure à la tension de vapeur saturée correspondant à la température à l'entrée de ce liquéfacteur. Il faut, en effet, vaincre la résistance du ressort qui maintient fermée la soupape de refoulement, ainsi que les résistances rencontrées par le fluide frigorigène, soit dans le passage au travers de l'ouverture de refoulement, soit dans la circulation à l'intérieur des tuyauteries raccordant le compresseur au liquéfacteur. Cette *surpression au refoulement* nécessite une nouvelle augmentation de la puissance fournie au compresseur.

20. — La compression n'est pas adiabatique. — Il faut, d'autre part, tenir compte de ce fait que, durant la compression, le fluide frigorigène cède de la chaleur aux parois du cylindre. La pression, qui règne à chaque instant dans le compresseur, est plus petite que la pression correspondant à la transformation adiabatique.

21. — Fuites par les organes du compresseur. Réchauffement de l'évaporateur. — Enfin, il convient de ne pas négliger les fuites inévitables par divers organes du compresseur, notamment par l'ensemble des garnitures de la tige du piston ou *presse-étoupe*. Il faut aussi tenir compte des

réchauffements parasites de l'évaporateur, qui obligent à vaporiser une plus grande quantité de fluide frigorigène que si cet organe de la machine était isolé thermiquement.

22. — Volume réel d'un compresseur. Puissances indiquée et effective à lui fournir. — De cette analyse des phases du fonctionnement réel d'un compresseur comparées aux phases correspondantes du fonctionnement théorique, résulte la nécessité d'accroître d'une part la puissance théorique à fournir au compresseur, et d'autre part le volume théorique balayé par le piston. Si on représente sur une même figure (fig. 6), le diagramme théorique défini plus haut et le diagramme réel du fonctionnement du compresseur, on voit combien ce dernier diffère du premier. En outre, la figure 8 montre nettement les déformations du diagramme réel produites par un espace nuisible exagéré [1].

Prenons un compresseur réel à anhydride carbonique d'une puissance de 100.000 frigories-heure. Le volume balayé par le piston dans une heure est égal à 37 mètres cubes, alors que le volume calculé plus haut est égal à 24 mètres cubes ; la différence est environ les 54 p. 100 du volume théorique. A une telle machine fonctionnant aux températures de — 10° C. à l'évaporateur, de + 24° C. au liquéfacteur (température de condensation du fluide frigorigène) et de + 10° C. à la vanne de réglage (température du liquide fri-

1. Les diagrammes réels sont tracés par la machine ; d'où les noms de *travail indiqué*, de *puissance indiquée*.

gorigène avant la vanne de réglage), il faut fournir en marche industrielle environ 36 chevaux indiqués, au lieu des 24 chevaux calculés plus haut, soit un accroissement de 50 p. 100 de la puissance théorique. En marche industrielle cette

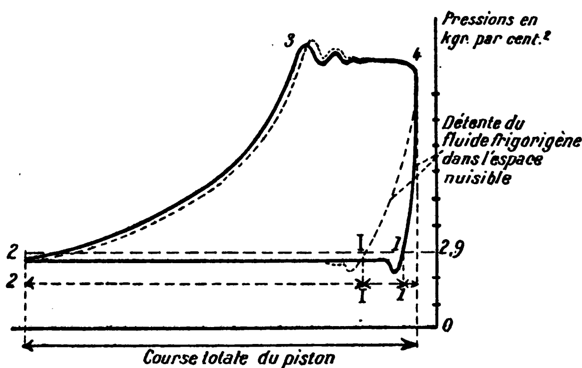


Fig. 8. — Diagrammes montrant l'effet de l'espace nuisible.

———, espace nuisible normal ;
- - - - -, espace nuisible exagéré.
1, ouverture de la soupape d'aspiration (espace nuisible normal) ; I, ouverture de la soupape d'aspiration (espace nuisible exagéré).

machine produit donc 2.800 frigories par cheval-heure indiqué au lieu des 4.132 qui ont été calculés plus haut, soit environ 70 p. 100 de la production théorique.

Si on admet 90 p. 100 pour le rendement mécanique de cette machine, on voit qu'il faut fournir sur l'arbre une puissance égale à 40 chevaux, ce qui correspond à une production de 2.500 frigories par cheval-heure effectif.

23. — Régime intérieur. — La production d'une

machine à froid, le travail ou la puissance qu'elle consomme pour une production donnée, sont, nous venons de le voir, des fonctions de trois températures, la température de vaporisation de l'agent frigorigène, sa température de liquéfaction et la température à laquelle il arrive à la vanne de réglage. Nous donnons à ces températures le nom de *températures intérieures de la machine*, et au régime de fonctionnement caractérisé par ces températures, le nom de *régime intérieur* de la machine.

En général, on a intérêt à faire fonctionner une machine à froid avec une température de vaporisation de l'agent frigorigène aussi élevée que le comportent les circonstances de la marche. Il vaut mieux, par exemple, fabriquer de la glace avec une température de vaporisation de l'agent frigorigène égale à — 10° C., qu'avec une température de vaporisation de cet agent égale à — 15° C.

24. — Rendement de l'évaporateur et du liquéfacteur. — Dans ce qui précède nous ne nous sommes pas préoccupés de la transmission des frigories du fluide frigorigène de l'évaporateur au milieu ambiant, ni de l'absorption de chaleur par l'eau circulant autour du liquéfacteur ; nous avons supposé implicitement que le milieu ambiant à l'évaporateur avait notamment une température égale à la température du fluide frigorigène. Il n'en est rien. Il y a une différence entre la température du fluide frigorigène et la température moyenne du milieu extérieur ambiant. Les frigories produites dans l'évaporateur ne se trans-

mettent pas en entier au milieu ambiant, le nombre de frigories produites dans l'évaporateur est plus grand que le nombre de frigories cédées au milieu extérieur. Le rapport de ce dernier nombre au premier est le *rendement de l'évaporateur*. Ce rendement dépend de la nature du fluide frigorigène et de celle du milieu ambiant, de la nature et de l'agencement de la surface par laquelle ces fluides sont en contact. Ce rendement est, en particulier, plus petit si les deux fluides échangeurs de frigories sont des vapeurs ou des gaz, que si ces deux fluides sont des liquides. De même le *rendement du liquéfacteur* est le rapport des calories absorbées par l'eau de circulation aux calories dégagées dans le liquéfacteur par la condensation et le refroidissement du fluide frigorigène.

25. — Régime extérieur. — L'usager de l'industrie frigorifique a plus spécialement intérêt à se rendre compte des valeurs de ces rendements de l'évaporateur et du liquéfacteur, qui caractérisent véritablement la machine grande productrice de froid et faible consommatrice d'eau de réfrigération. En d'autres termes, le constructeur doit pouvoir indiquer la production en frigories et la puissance absorbée, non seulement en fonction des températures du régime intérieur, mais encore en fonction de ce que nous appellerons les *températures du régime extérieur*, c'est-à-dire la température ambiante à l'évaporateur, les températures de l'eau de condensation à l'entrée et à la sortie du condenseur.

26. — Conditions normales de fonctionnement. — On peut définir les *conditions normales du fonctionnement* d'une machine frigorifique au moyen des températures normales du régime intérieur et du régime extérieur. Nous proposons de prendre pour *températures normales du régime intérieur :* — 10° C. (température de vaporisation de l'agent frigorigène) ; + 25° C. (température de condensation de l'agent frigorigène) ; + 15° C. (température de l'agent frigorigène à son arrivée à la vanne de réglage) ; — et pour *températures normales du régime extérieur :* — 5° C. (température du liquide incongelable ambiant à l'évaporateur) ou 0° C. (température de l'air ambiant à l'évaporateur) ; + 12° C. (température de l'eau de circulation à l'entrée du liquéfacteur) ; + 20° C. (température de l'eau de circulation à la sortie du liquéfacteur).

Tout constructeur devrait indiquer pour chacun de ses types de machines, la production de frigories et la puissance dépensée non seulement en fonction des régimes normaux intérieurs et extérieurs, mais en fonction d'une série d'autres régimes caractérisés par des températures différentes des précédentes, afin de permettre aux acheteurs de machines frigorifiques de se rendre compte par avance du fonctionnement de la machine commandée.

27. — La marche en surchauffe améliore le régime intérieur de la machine, mais n'a pas en général d'effet sur le régime extérieur. — Lorsqu'on soumet une machine frigorifique à des essais comparatifs, on

arrive à la conclusion suivante. Le nombre de frigories *produites* dans l'évaporateur par cheval-heure indiqué fourni au compresseur est plus grand, lorsque celui-ci fonctionne en régime sec que lorsqu'il fonctionne en régime humide. La surchauffe de la vapeur au moment de la compression est donc favorable au point de vue du régime intérieur de la machine.

Mais, *à moins de prendre des précautions spéciales, cette surchauffe n'a, en général, aucune répercussion sur le régime extérieur*[1].

On peut facilement se rendre compte de la raison pour laquelle le régime extérieur de la machine ne bénéfice presque pas de l'amélioration du régime intérieur. Avec la marche sans surchauffe, en régime humide, on cherche à obtenir un certain entraînement du liquide frigorigène à l'intérieur du compresseur. En comprimant un mélange de liquide et de vapeur suffisamment chargée de liquide à la fin de l'aspiration, on est certain de ne pas avoir de surchauffe à la fin de la compression. Pour obtenir cet entraînement de liquide dans le compresseur, on est obligé de maintenir l'évaporateur presque entièrement plein de ce liquide par une ouverture convenable de la vanne de réglage. L'échange de frigories avec le milieu extérieur se fait dans de bonnes conditions par toute la surface de l'évaporateur; le rendement de celui-ci est élevé.

Au contraire, quand on veut obtenir la sur-

1. A. Desvignes. Rapport général sur les travaux de la deuxième section du Congrès International du Froid tenu à Paris en 1908.

chauffe, il faut supprimer l'entraînement de liquide en faisant baisser son niveau dans l'évaporateur, ce qui s'obtient par l'étranglement de la vanne de réglage. Il en résulte un plus mauvais échange de frigories que dans le cas de la marche en régime humide ; le rendement de l'évaporateur baisse. L'écart de température entre l'agent frigorigène et le véhicule du froid (milieu ambiant à l'évaporateur) va en augmentant ; pour une même température de ce dernier, la température de l'agent frigorigène à l'intérieur de l'évaporateur va en diminuant, et le rendement de la machine frigorifique marchant en surchauffe se met à son tour à décroître. Pour toutes ces raisons le nombre de frigories cédées au milieu ambiant à l'évaporateur par cheval-heure fourni au compresseur est *sensiblement constant ou même décroissant.*

28. — Comment on peut étendre au régime extérieur l'amélioration du régime intérieur due à la surchauffe. — L'amélioration du régime intérieur due à la surchauffe peut être étendue au régime extérieur, en maintenant dans le réfrigérant avec la marche en surchauffe, la même quantité de liquide que celle qui s'y trouve pour la marche avec vapeur saturée. C'est ce qu'un ingénieur allemand, M. Dœderlein, a exprimé très clairement par l'axiome suivant : *On doit fonctionner avec un réfrigérant aussi humide que possible et un compresseur aussi sec que possible.*

Plusieurs dispositifs ont été proposés pour remplir ce but : le plus simple consiste à intercaler

dans la conduite d'aspiration un séparateur qui retient le liquide entraîné, lequel retourne à l'évaporateur, soit par son propre poids, soit par l'intermédiaire d'une petite pompe.

29. — Compresseur à multiple effet. — Nous avons supposé que le compresseur d'une machine frigorifique aspirait dans un seul évaporateur maintenu à une température déterminée. On peut dans certains cas être amené à mettre le compresseur en relation avec divers évaporateurs à des températures différentes. Ainsi dans la fabrication de la glace, il peut y avoir avantage à refroidir séparément l'eau à congeler et le bain de saumure dans lequel s'opère la congélation ; dans le premier réfrigérant, il suffira d'une température intérieure égale à — 5° pour amener l'eau à 0° ; dans le second réfrigérant, une température intérieure égale à — 10° sera suffisante pour avoir un bain à — 5°. On obtient ce résultat de la manière suivante. Lorsque le piston du compresseur qui aspire d'abord dans le réfrigérant le plus froid, est arrivé à fond de course, un mécanisme ou une simple ouverture (qui se démasque automatiquement), met le réfrigérant le plus chaud en communication avec l'intérieur du cylindre ; la vapeur à — 5° se mélange à celle à — 10°, la pression monte brusquement jusqu'à ce que le poids de vapeur à — 5°, qui entre dans le cylindre, l'ait portée à la pression correspondant à cette dernière température (dans le cas de l'anhydride carbonique cet accroissement de pression est égal à 4 atmosphères). Lorsque le cylindre est ainsi rempli, les vapeurs

sont comprimées et refoulées au condenseur. Tel est le principe du fonctionnement d'un compresseur auquel un inventeur américain, M. Gardner Tufts Voorhees, a donné le nom de *fonctionnement à multiple effet*.

Pour obtenir la même production de frigories avec un compresseur ordinaire, n'agissant que sur un seul réfrigérant à — 10° comme cela se fait généralement, il faudrait donner à ce compresseur un volume de 19 p. 100 plus grand que celui du compresseur à multiple effet et la puissance industrielle absorbée serait alors de 4 p. 100 plus élevée que pour ce dernier. On pourrait aussi employer deux compresseurs, l'un ayant le même volume que s'il devait fonctionner à multiple effet, mais qui n'aspirerait que dans le réfrigérant à — 10° ; et l'autre qui produirait dans le réfrigérant à — 5° les frigories nécessaires à l'abaissement de la température de l'eau de congélation. On trouve alors que le volume de ce second compresseur devrait être égal aux 16 p. 100 de celui du premier et que la puissance indiquée totale absorbée par ces deux compresseurs serait de 1 p. 100 plus élevée que pour un compresseur à multiple effet.

30. — Rôle de la vanne de réglage. — Une dernière question doit être examinée; elle concerne la régulation des machines frigorifiques. Le régime uniforme d'une telle machine est caractérisé de la manière suivante.

Le poids de l'agent frigorigène qui, au travers de la vanne dite de régulation, se rend à l'évapo-

rateur, est égal à celui que le compresseur aspire dans le même temps dans l'évaporateur et envoie après compression au liquéfacteur.

Ce régime correspond à une ouverture déterminée de la vanne de régulation.

Si celle-ci a une ouverture trop faible pour le régime de marche du compresseur, il passe moins de fluide frigorigène du liquéfacteur à l'évaporateur que dans les conditions normales; le niveau du liquide baisse dans l'évaporateur et s'élève dans le liquéfacteur; la température augmente dans celui-ci (pour une température constante de l'eau à l'entrée du condenseur) et s'abaisse dans celui-là.

Les phénomènes inverses se produisent pour une ouverture trop grande de la vanne de régulation.

C'est le mécanicien qui doit agir sur l'ouverture de la vanne de régulation, suivant les diverses circonstances du fonctionnement de la machine. Il en est ainsi, par exemple, à certaines époques de la journée, lorsque des marchandises chaudes sont introduites dans les chambres de réfrigération.

Toutefois, les machines qui fonctionnent à surchauffe avec un séparateur de liquide entre l'évaporateur et le compresseur, présentent un certain degré d'*autorégulation*. Si la vanne de régulation est un peu trop fermée, le fluide présent dans le cylindre à la fin de l'aspiration est de la vapeur légèrement surchauffée au lieu d'être de la vapeur saturée; le poids de ce fluide surchauffé est moindre que celui du fluide saturé.

S'il arrive moins de liquide à l'évaporateur, il en est envoyé également moins au liquéfacteur.

Cette autorégulation ne se maintient d'ailleurs que dans des limites de fonctionnement voisines des conditions primitives. Dans la plupart des cas, il est nécessaire que le mécanicien intervienne. Il convient qu'il ait une règle simple lui permettant un réglage efficace. L'ingénieur allemand Dœderlein, dont nous avons parlé plus haut, a proposé la suivante.

Les tuyaux de refoulement doivent être chauds (80° à 100°) au voisinage des soupapes correspondantes; les tuyaux d'aspiration doivent être recouverts de givre blanc au voisinage des soupapes d'aspiration.

Tuyaux de refroidissement chauds, tuyaux de refroidissement blancs (Druckrohre heiss, Saugrohre weiss) dit l'allemand.

§ 2. — Le compresseur.

1. — Règles générales à suivre dans la construction des compresseurs. — Les considérations développées plus haut nous indiquent quelques règles à suivre dans la construction du compresseur.

a) *L'espace nuisible doit être aussi réduit que possible.* — On réalise cette condition en rapprochant le plus possible, à fond de course, la surface du piston du fond correspondant du cylindre. Un tel mode de construction est ici possible grâce aux faibles dilatations. D'ailleurs on tient compte de la dilatation de la tige du piston en prenant, dans un compresseur horizontal,

à double effet, l'espace nuisible arrière un peu plus grand que l'espace nuisible avant.

b) *Les soupapes doivent avoir une grande section.* — Afin de réduire autant que possible la dépression à l'aspiration et la suppression au refoulement, on donne aux soupapes une grande section.

Si les faces du piston sont droites et les fonds de cylindres plats, on ne peut construire de grandes soupapes qu'au prix d'un accroissement de l'espace nuisible. C'est pourquoi les compresseurs à ammoniaque et à anhydride sulfureux présentent le mode de construction indiqué par le grand ingénieur allemand Linde : les fonds de cylindre ont la forme de sphères et les faces du piston épousent la même forme. De cette manière la distance à fond de course entre les deux faces correspondantes du piston et du fond de cylindre ne dépasse pas $0^{mm},5$ à $0^{mm},75$.

c) *L'emploi des compresseurs à grande vitesse de rotation* (100 à 160 tours par minute pour les grands compresseurs au lieu de 50 à 60) permet l'utilisation de compresseurs plus petits et la commande directe au moyen de machines à vapeur, à gaz ou à pétrole, ou même de dynamos à grande vitesse de rotation.

Ces grandes vitesses nécessitent des dispositifs d'ouverture et de fermeture rapides des soupapes. L'adjonction à celles-ci d'amortisseurs empêchant le mattage des sièges; la construction de soupapes légères; enfin, la multiplication du nombre des soupapes soit d'aspiration, soit de refoulement, si l'on ne veut pas avoir de trop

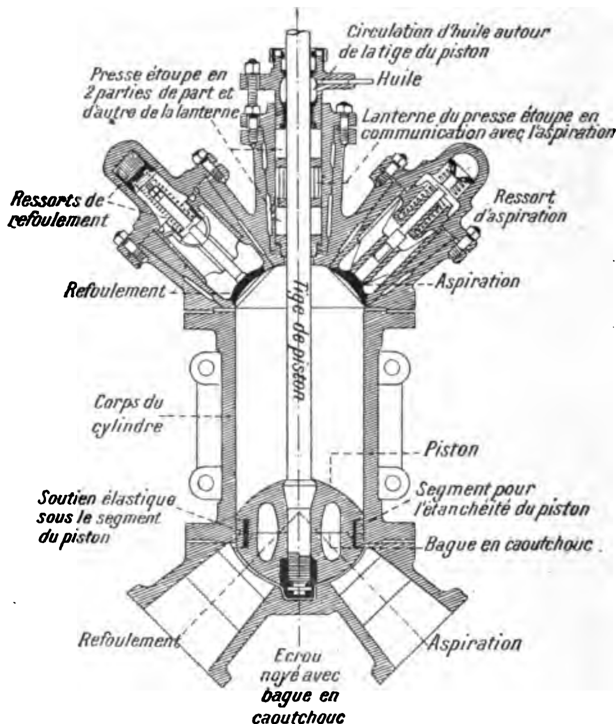


Fig. 9. — Coupe de cylindre de compresseur Linde à ammoniaque.

grandes soupapes nécessitant des diamètres exagérés des cylindres.

Fg. 10. — Compresseur Sulzer-Linde à ammoniaque, type normal.

A, conduite d'aspiration ; B, soupapes d'aspiration ; C, soupapes de refoulement ; D, conduite de refoulement ; E, séparateur d'huile ; F, soupape de retenue ; G, conduite de dérivation ; H, thermomètre ; J, raccord du manomètre de refoulement ; K, robinet rotatif ; L, pompe à huile ; M, lanterne du presse-étoupe ; *a*, tuyau servant, d'une part à l'échappement dans la conduite d'aspiration des vapeurs d'ammoniaque qui ont traversé la première partie du presse-étoupe, et d'autre part à amener le lubrifiant, dont une partie va dans l'aspiration ; *b*, conduite d'huile allant au réservoir d'huile.

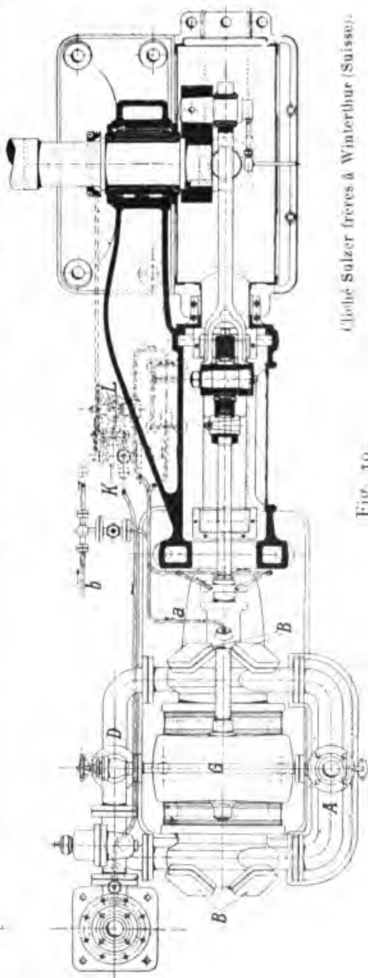


Fig. 10.

Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

d) Les fuites doivent être réduites au minimum par l'emploi autour des tiges des pistons de *presse-étoupes* particulièrement étanches, surtout dans les compresseurs à anhydride carbonique, à l'intérieur desquels règnent des pressions de 70 à 80 atmosphères.

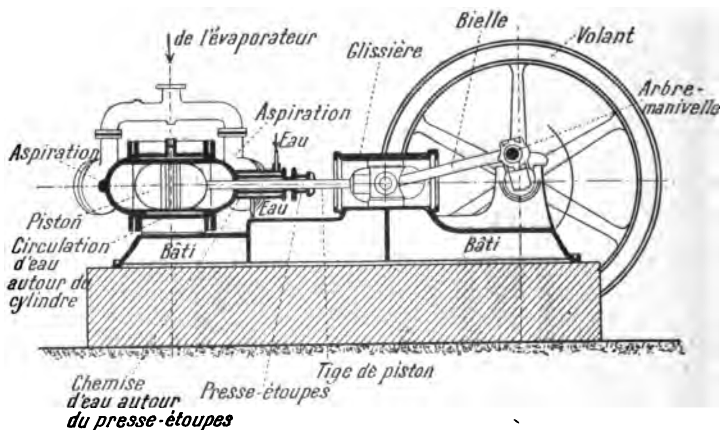


Fig. 11. — Compresseur Pictet à l'anhydride sulfureux (vue en élévation).

Nous allons passer en revue quelques-uns des modes de construction adoptés actuellement.

2. — Cylindres et pistons. — La plupart des compresseurs à ammoniaque et à anhydride sulfureux portent, à chaque extrémité, des fonds en forme de calotte sphérique, coulés d'une seule pièce avec les logements des soupapes d'aspiration et de refoulement. L'un des fonds porte en outre le presse-étoupe. Les logements des sou-

papes ont leurs axes faisant un angle de 30 à

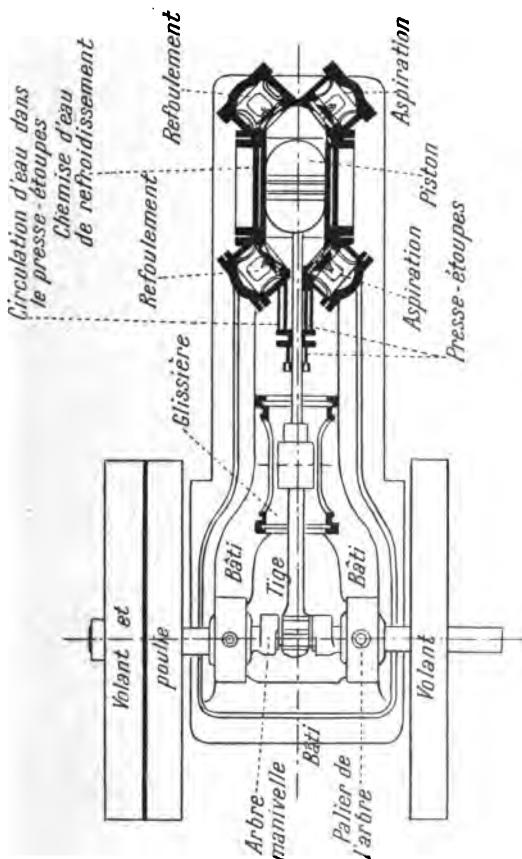


Fig. 11 *bis*. — Compresseur Pictet à l'anhydride sulfureux (vue en plan).

50 degrés avec l'axe du cylindre (fig. 9, 10, 11, 11 *bis*).

Certains compresseurs de construction américaine et le compresseur Delaunay-Belleville sont

à fonds plats (fig. 12, 12 *bis*); les soupapes sont alors logées dans les fonds du cylindre ou sur les côtés.

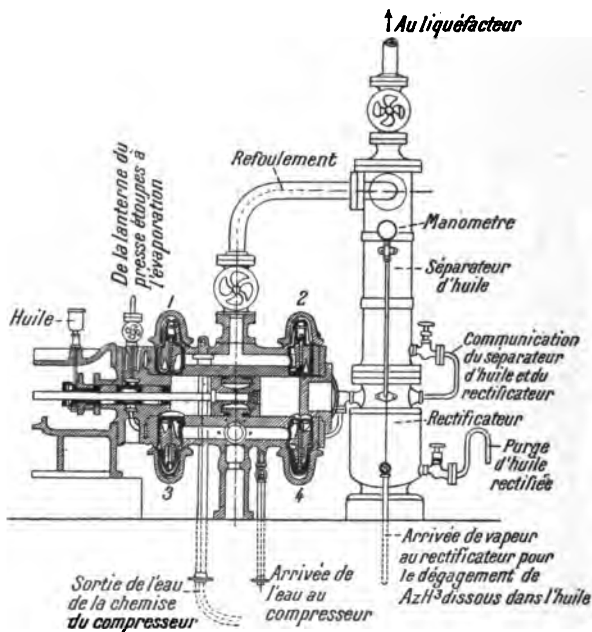


Fig. 12. — Compresseur à ammoniaque Delaunay-Belleville. Coupe parallèle à l'axe du compresseur.

1, 2, soupapes de refoulement ; 3, 4, soupapes d'aspiration.

Les faces des pistons épousent les formes des fonds des cylindres; l'étanchéité est obtenue au moyen de segments métalliques.

Les cylindres des compresseurs à ammoniaque et à anhydride sulfureux sont en fonte.

Les cylindres des compresseurs à anhydride carbonique sont généralement forés dans un solide bloc d'acier forgé; ils doivent résister à

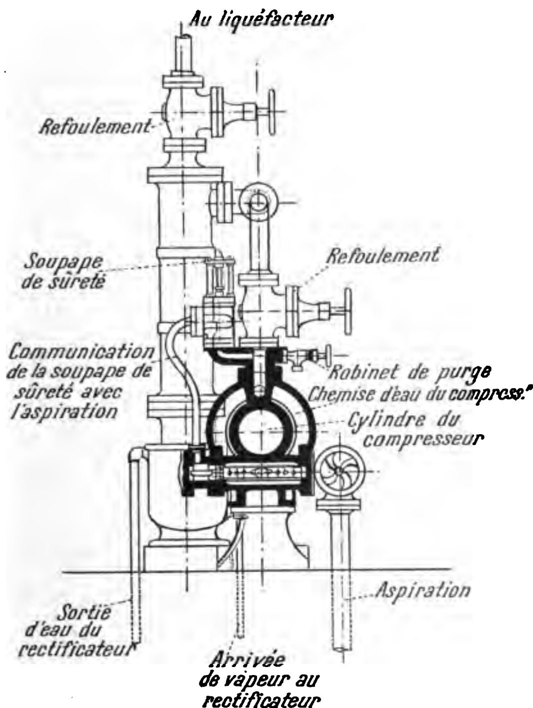


Fig. 12 *bis*. — Compresseur à ammoniaque Delaunay-Belleville. Coupe normale à l'axe du compresseur.

une épreuve de 200 à 250 atmosphères (fig. 13 et 13 *bis*).

L'étanchéité des pistons est obtenue dans ces compresseurs au moyen de cuirs emboutis que la

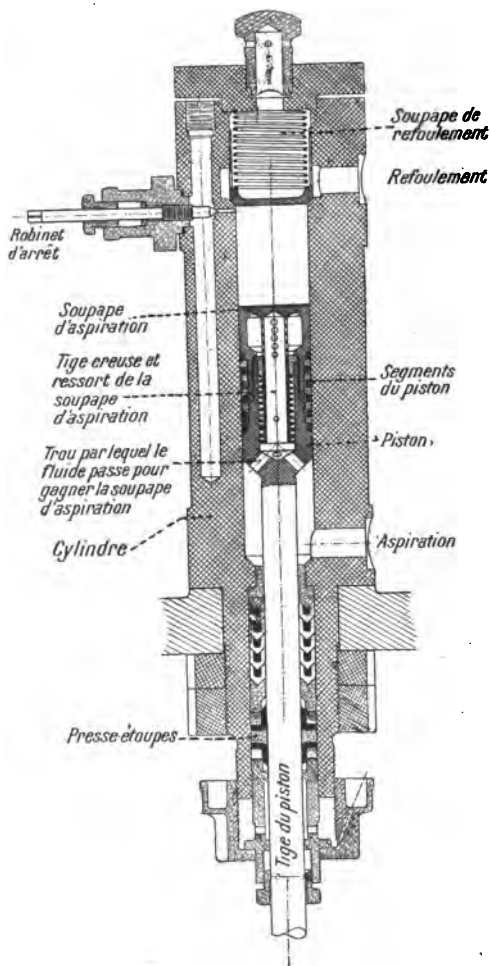


Fig. 13. — Compresseur à simple effet à acide carbonique de la *Société du Froid Industriel.*

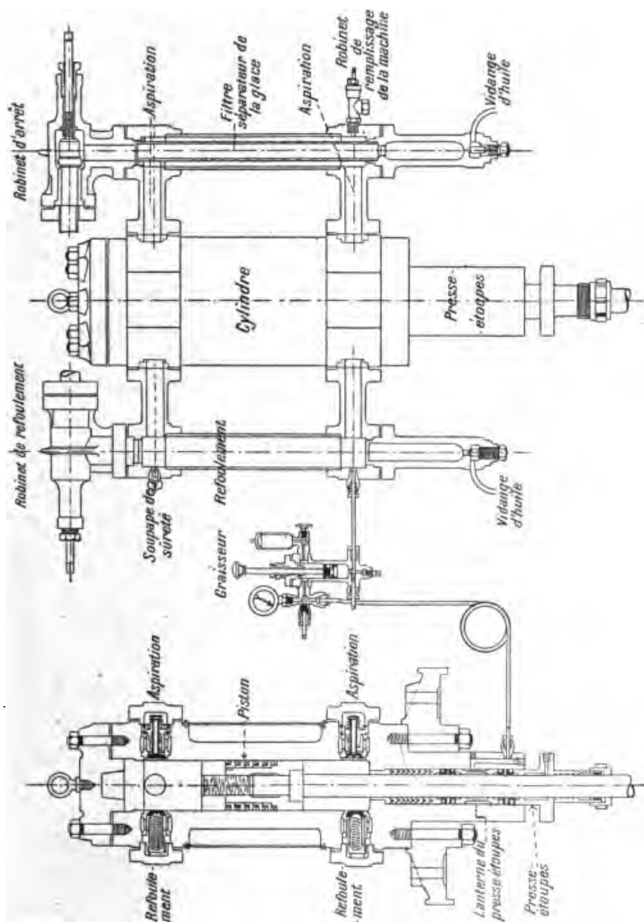


Fig. 13 *bis*. — Compresseur à double effet à acide carbonique de la *Société du Froid Industriel*.

pression du gaz applique fortement contre les parois du cylindre.

3. — **Le presse-étoupe.** — Le *presse-étoupe* est une des parties essentielles du compresseur. Son étanchéité est capitale. Des fuites de fluide comprimé diminuent le rendement de la machine et peuvent incommoder les mécaniciens ou même mettre leur vie en danger.

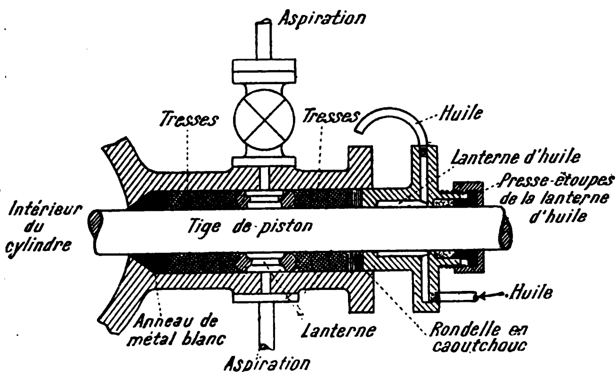


Fig. 14. — Presse-étoupe Linde (compresseur à ammoniaque).

Le type le plus généralement employé est dû à Linde (fig. 14). Il est composé en principe de deux garnitures, entre lesquelles est intercalée une pièce métallique présentant la forme d'une lanterne ; celle-ci laisse autour de la tige du piston un évidement, qui est mis en communication avec la conduite d'aspiration par deux orifices pratiqués dans le logement du presse-étoupe. La première garniture située du côté du cylindre est soumise à l'excès de la pression du liquéfacteur sur celle de l'évaporateur ; mais les vapeurs du fluide comprimé qui traversent cette première garniture, reviennent au réfrigérant. La seconde

garniture n'est plus soumise qu'à l'excès de la pression du réfrigérant sur la pression extérieure; son étanchéité est plus aisément réalisable, les chances de fuite sont moindres. Les deux garnitures sont constituées, soit par des anneaux en étoupe tressée, soit par des anneaux en caoutchouc, spécialement préparés, souvent

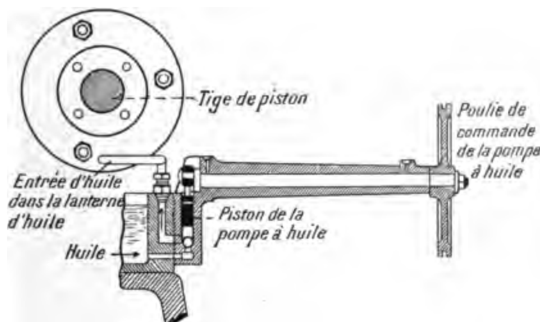


Fig. 15. — Circulation d'huile dans la lunette du presse-étoupe Linde.

séparés par des anneaux métalliques. Le tout est serré au moyen d'une lunette à l'intérieur de laquelle circule de l'huile (fig. 15) ; un écrou étanche termine le presse-étoupe. Certaines garnitures sont entièrement métalliques.

4. — Compresseur Compound : un seul presse-étoupe sur le cylindre à basse pression. — Au lieu de soumettre le presse-étoupe à la pression du liquéfacteur, on ne lui fait supporter qu'une pression moindre. Le cylindre compresseur est formé de deux parties de diamètres différents constituant en réalité deux cylindres dans lesquels se meu-

vent des pistons montés sur une même tige (fig. 16). Chacun de ces cylindres agit comme un compresseur à simple effet. Le cylindre de plus grand diamètre aspire dans le réfrigérant ; il refoule le fluide comprimé une première fois dans une chambre intermédiaire ; c'est le cylindre à basse pression, il porte le presse-étoupe. Le second

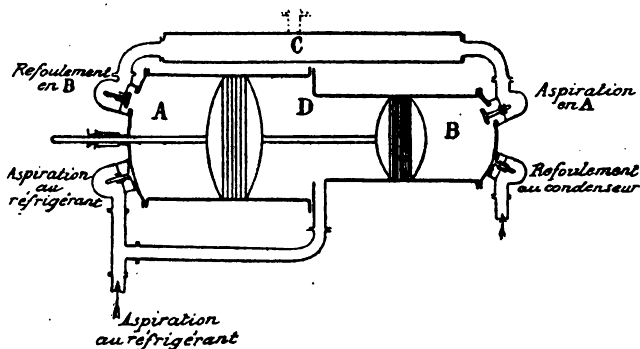


Fig. 16. — Schéma d'un compresseur compound Linde.

A, compresseur basse pression ; B; compresseur haute pression ; C, canal de communication entre A et B ; D, espace entre les deux pistons.

cylindre de diamètre moindre aspire à son tour dans la chambre intermédiaire et refoule le fluide comprimé au liquéfacteur; c'est le cylindre à haute pression ; il ne porte pas de presse-étoupe. L'intervalle libre compris entre les deux pistons calés sur le même arbre est en relation constante avec l'évaporateur; les deux pistons supportent donc sur l'une des faces la pression existant dans celui-ci. Tel est le principe du *compresseur à ammoniaque tandem compound*

de la Société Linde; ce type est très employé

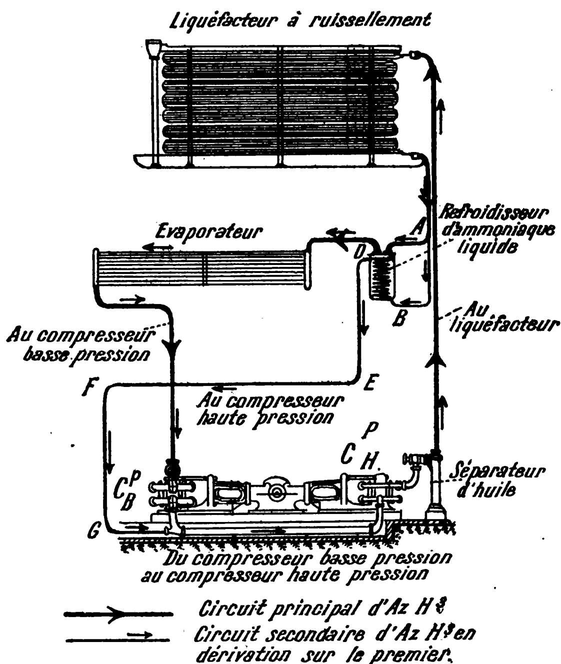


Fig. 17. — Schéma d'une installation frigorifique avec compresseur double compound. [Construction Sulzer frères à Winterthur pour l'abattoir de Cuatreros (République Argentine)].

A B D E F G, circuit dérivé d'ammoniaque en relation directe avec le conduit allant du compresseur basse pression C_B^p au compresseur haute pression C_H^p. L'ammoniaque venant du liquéfacteur à la pression maxima du cylindre C_H^p est portée dans le serpentin BD à la pression maxima beaucoup plus basse du cylindre C_B^p; d'où évaporation rapide et refroidissement du liquide frigorigène allant à l'évaporateur.

sur les machines installées dans les pays chauds.

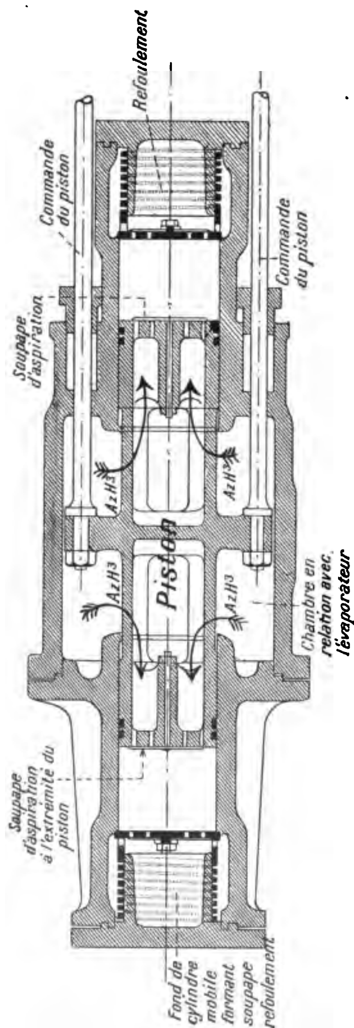


Fig. 18. — Compresseur Sterne.

La firme Sulzer construit pour les pays chauds un compresseur compound (fig. 17) dans lequel la compression est répartie sur deux cylindres munis chacun d'un presse-étoupe.

5. — Le presse-étoupe est soumis uniquement à la pression de l'évaporateur. — Au lieu de faire en sorte que la pression sur le presse-étoupe soit toujours comprise entre les pressions de l'évaporateur et du liquéfacteur, on peut construire un compresseur dont le presse-étoupe ne supporte que la pression de l'évaporateur. Tel est le

cas du *compresseur Lebrun* et du *compresseur Stern.* L'un et l'autre comportent deux cylindres

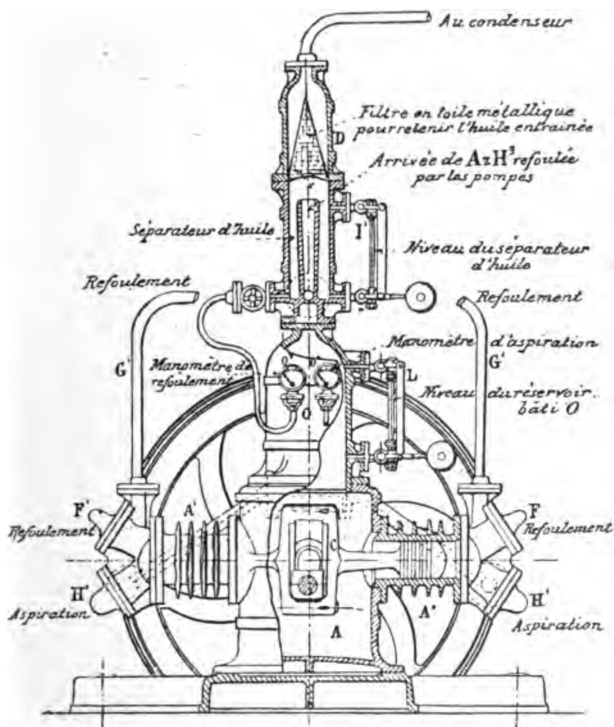


Fig 19. — Compresseur Lebrun.

A, corps central plein d'huile et soumis à la pression de l'évaporateur ; A', A', compresseurs à simple effet ; C, cadre pour l'attaque des deux pistons dont les axes sont dans le prolongement l'un de l'autre ; F, F', soupapes de refoulement ; H', H', soupapes d'aspiration ; G', G', tuyaux de refoulement ; D, cloche supérieure contenant le filtre de retenue de l'huile ; I', niveau du séparateur d'huile ; L, niveau du réservoir-bâti O ; O' manomètre de refoulement ; O'', manomètre d'aspiration.

à simple effet horizontaux et opposés, dont les axes sont en prolongement ; les deux pistons peu-

vent être commandés de l'extérieur de la machine. Dans le compresseur Sterne (fig. 18), une chambre en communication constante avec le réfrigérant relie les deux cylindres; les pistons portent les soupapes d'aspiration; les fonds des cylindres sont mobiles et jouent le rôle de soupapes de refoulement; le presse-étoupe de la tige de commande de l'équipage portant les deux pistons se trouve sur la chambre de liaison des deux cylindres. Le fluide aspiré dans l'évaporateur entrant d'abord dans cette chambre, passe au travers de l'une des soupapes encastrée dans un des pistons à l'intérieur de l'un des cylindres de travail.

Dans le compresseur Lebrun chacun des cylindres à simple effet a la forme d'un compresseur Linde; la chambre qui relie les deux cylindres de travail est pleine d'huile; elle supporte à son intérieur la pression de l'évaporateur.

6. — **Presse-étoupe avec pompe annexe.** — La *Société Dyle et Bacalan*, qui construit les compresseurs Hall à anhydride carbonique, arrête les pertes de fluide au travers du presse-étoupe en injectant dans celui-ci, au moyen d'une pompe spéciale, de la glycérine à une pression supérieure à la tension existant dans le liquéfacteur; la glycérine peut ainsi pénétrer dans le cylindre du compresseur où elle joue le rôle de lubrifiant (fig. 20).

7. — **Le graissage.** — La glycérine est, nous venons de le voir, le lubrifiant des machines à anhydride carbonique. Ce corps est aussi employé

pour le graissage des machines à chlorure de méthyle (machines de la maison Douane de Paris).

Dans les machines à anhydride sulfureux, le lubrifiant est le fluide lui-même à l'état liquide. Pour obtenir une lame d'anhydride sulfureux liquide entre le piston et le corps de pompe du compresseur, on a prévu une circulation d'eau de réfrigération soit autour du cylindre du compresseur, soit à l'intérieur du piston (fig. 11 et 11 *bis*).

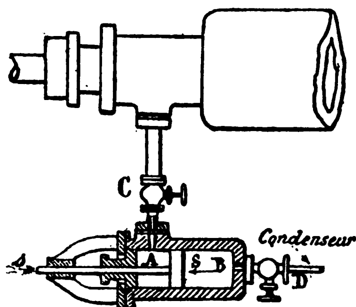


Fig. 20. — Presse-étoupe Dyle et Bacalan (machine à acide carbonique).

En B par D agit la pression P du condenseur ; sur la face du piston située du côté B s'exerce la force PS ; sur la face opposée s'exerce la force ps (p, pression atmosphérique) ; la pression de la glycérine en A est donc $\frac{PS - ps}{S - s} = P + \frac{(P - p)\frac{s}{S}}{1 - \frac{s}{S}}$. La glycérine peut alors pénétrer dans le cylindre du compresseur par C au travers du presse-étoupe.

Dans les machines à ammoniaque, le lubrifiant est l'huile de Bakou. Elle dissout les vapeurs ammoniacales en augmentant de volume. Pour obtenir le graissage du cylindre, il suffit de déposer une lame d'huile à la surface de la tige du piston; en pénétrant dans le compresseur, cette huile foisonne en dissolvant du gaz ammoniac; elle reste dans le cylindre qu'elle lubrifie. Dans les nouveaux compresseurs Linde-Sulzer, on envoie l'huile goutte à goutte dans la conduite d'aspiration.

8. — Les soupapes. Conditions de construction. — Les *soupapes* des compresseurs sont *automatiques ;* elles doivent satisfaire à un certain nombre de conditions.

1° *Il faut que la soupape offre au passage des vapeurs un orifice d'une section assez grande pour que sa levée soit aussi petite que possible.*

On réduit ainsi la résistance rencontrée par le fluide à son passage au travers des ouvertures de la soupape. De plus, comme la soupape de refoulement s'ouvre de l'intérieur vers l'extérieur du cylindre, on diminue l'espace nuisible en rendant sa levée plus petite.

2°. *Il faut que l'ouverture de la soupape arrive rapidement à sa valeur maxima et que la fermeture se produise également d'une manière rapide, aussitôt après le changement de course du piston.*

Il convient donc de munir les soupapes de ressorts suffisamment puissants.

3° *Il faut que la soupape, en reposant sur son siège, produise une fermeture hermétique.* La tige de la soupape, lorsqu'elle existe, doit donc passer dans un guide bien centré disposé dans l'enveloppe où se trouve le siège de la soupape.

D'autre part la *soupape*, en *retombant sur son siège, ne doit pas produire un mattage de celui-ci.* Elle doit donc être munie d'un amortisseur qui, dans le cas actuel, est un amortisseur pneumatique.

4° *Les soupapes doivent être facilement accessibles.* On doit pouvoir les visiter durant la

marche du compresseur en démontant le plus petit nombre de pièces possible.

5° Les *soupapes doivent présenter des organes susceptibles, en cas de rupture, de les empêcher de tomber dans le cylindre.*

On n'éprouve pas de difficulté à satisfaire dans de larges limites à la première condition en employant des soupapes aussi larges que possible. Mais plus les soupapes sont larges, plus leur poids est considérable, et plus il est difficile de satisfaire à la condition de leur ouverture et de leur fermeture rapides. Il convient donc, pour satisfaire aux deux premières conditions indiquées plus haut, de construire les soupapes en métal aussi dur et aussi tenace que possible, afin de réduire au minimum le poids du plateau et de la tige de la soupape. De grandes soupapes avec une levée égale au quart de leur diamètre conviennent pour les compresseurs qui tournent lentement. Mais, pour les compresseurs à grande vitesse, il est préférable d'employer un grand nombre de soupapes petites et légères dont la levée ne dépasse pas quelques millimètres.

9. — Divers types de soupapes. — Les soupapes à plateaux et tiges sont les plus employées sur les divers compresseurs (fig. 21). La soupape est en acier au creuset de première qualité. Les sièges sont faits de divers matériaux : acier Martin dans les machines à ammoniaque ; fonte dure et à grain fin dans les machines à anhydride sulfureux ; bronze phosphoreux dans les machines à anhydride carbonique.

Dans les compresseurs à grande vitesse, on réduit parfois les soupapes à de simples disques.

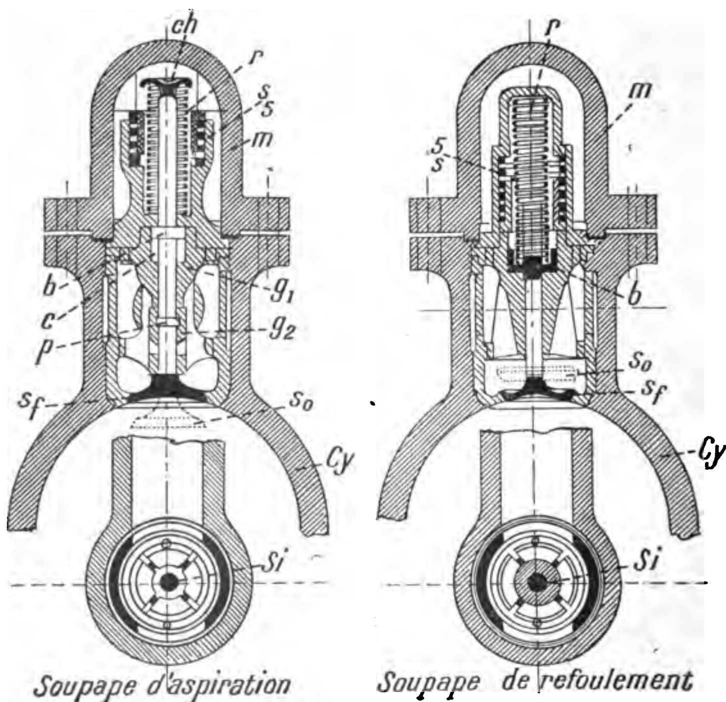


Fig. 21. — Soupapes à tiges du type Linde.

b, **butée du ressort *r* ; *c*, coussin d'air pour le freinage de la soupape; g_1, g_2, parties de la glissière-guide de la tige de soupape; *m*, calotte recouvrant le ressort *r*; *r*, ressort principal de la soupape ; s_f, soupape fermée; s_o, soupape ouverte ; s_i, siège de la soupape ; C_y, cylindre du compresseur; *ch*, chapeau supérieur de la soupape ; s_5, ressort de butée du chapeau *ch* ; $5_{,}$, ressort de butée de la soupape de refoulement; *p*, pont (sur la tige de la soupape d'aspiration) pour empêcher la soupape de tomber en cas de rupture de la tige à l'intérieur du cylindre.**

C'est ainsi que les compresseurs à anhydride sulfureux Raoul Pictet comportent un système de

clapets légers et sans ressort, se composant d'une plaque flexible en tôle d'acier mince, découpée de manière à constituer une sorte de spirale qui, formant ressort, vient s'appliquer et se maintient d'elle-même sur son siège auquel elle est d'ailleurs fixée par sa partie centrale (fig. 22). Des clapets

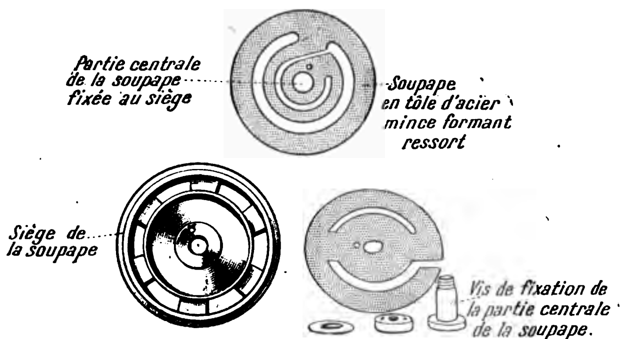


Fig. 22. — Soupapes très légères pour compresseur à anhydride sulfureux (type Pictet).

de ce type ont donné des résultats satisfaisants, aux grandes vitesses de 100 à 450 tours par minute. La Société Génevoise emploie des clapets analogues dans ses compresseurs à anhydride sulfureux. La maison Delion et Lepeu de Paris utilise dans ses compresseurs à anhydride sulfureux un anneau métallique plat en acier extra-mince, posé sur son siège, librement et sans aucune attache ; cet anneau est maintenu au contact par un ressort très léger de tension fixe. En Allemagne, les clapets Gutermuth sont formés d'une plaque de tôle mince, dont une partie est enroulée autour d'un

guide, partie qui joue le rôle de ressort (fig. 23 et 24).



Soupape d'aspiration. Soupape de refoulement.

Fig. 23. — Soupapes très légères pour compresseurs à anhydride sulfureux (clapets Gutermuth fermés).



Soupape d'aspiration (S'ouvre vers l'intérieur du compresseur). Soupape de refoulement (S'ouvre vers l'extérieur du compresseur).

Fig. 24. — Soupapes très légères pour compresseurs à anhydride sulfureux (clapets Gutermuth ouverts).

10. — Soupape de sûreté. — Outre les soupapes d'aspiration et de refoulement, un grand nombre de compresseurs portent une soupape de sûreté qui met en communication, en cas de surpression accidentelle, soit la conduite de refoulement avec celle

d'aspiration, soit l'intérieur du cylindre du compresseur avec l'atmosphère extérieure (fig. 12 *bis*).

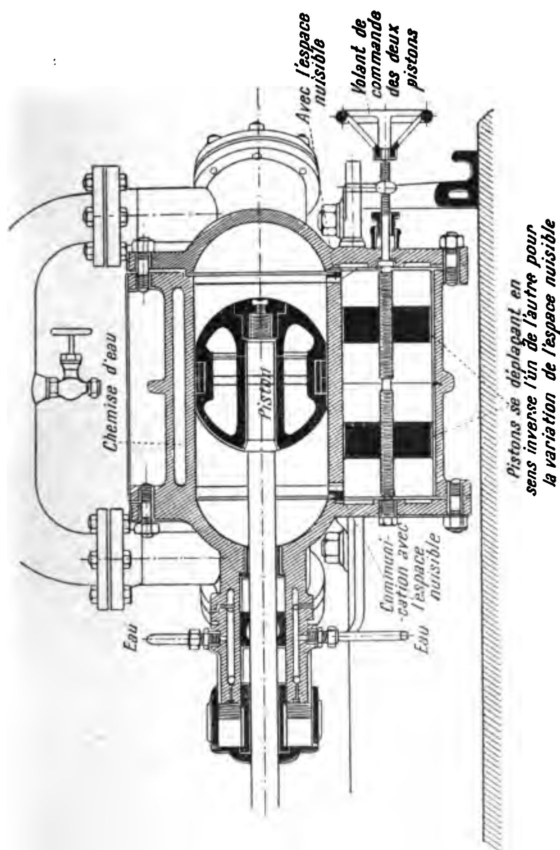


Fig. 25. — Réducteur de la puissance frigorifique (type Borsig). Compresseur à anhydride sulfureux.

11. — Réducteur de la puissance frigorifique. — Quand on veut faire marcher un compresseur à puissance réduite, on munit celui-ci d'un dispositif

permettant l'agrandissement de l'espace nuisible. Cet appareil se compose dans les compresseurs à anhydride sulfureux du type Borsig (fig. 25), d'une chambre dont l'axe est parallèle à celui du cylindre du compresseur et qui commu-

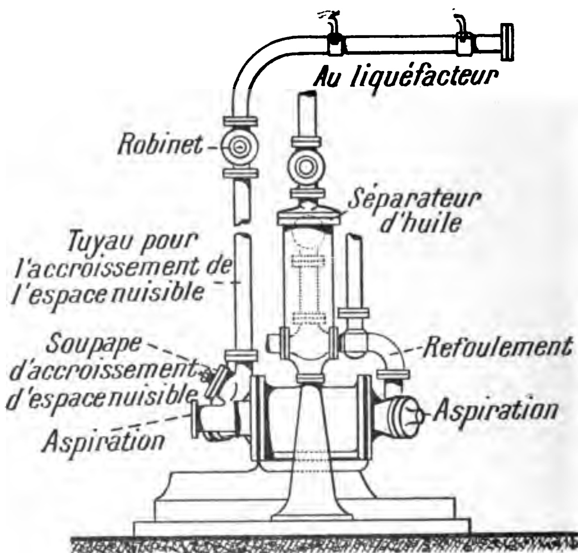


Fig. 26. — Réducteur de puissance frigorifique (type Linde pour compressseurs à ammoniaque).

nique par ses deux extrémités avec les espaces nuisibles de celui-ci. Deux pistons étanches peuvent se déplacer dans cette chambre ; ils permettent d'agrandir les espaces nuisibles du compresseur ; leur mouvement est obtenu de l'extérieur au moyen d'une commande à tige filetée commune.

Dans les compresseurs à ammoniaque du type Linde, le réducteur de puissance est constitué par une soupape isolée, sur le corps de laquelle

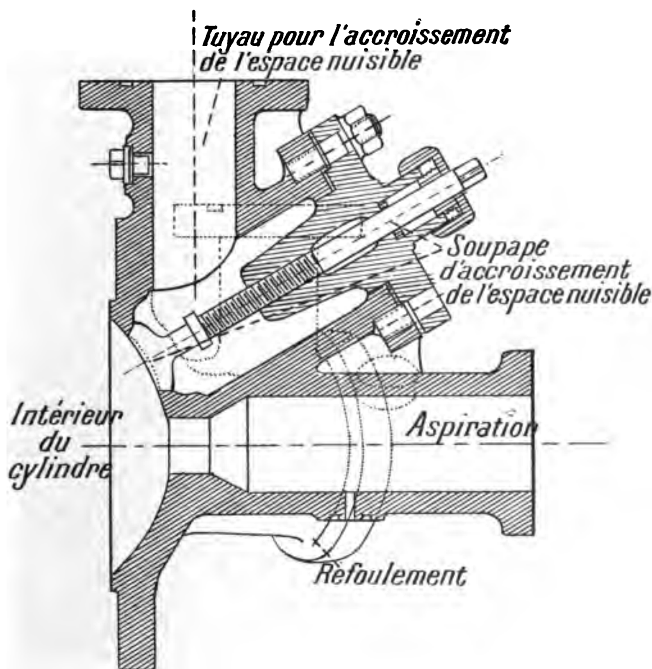


Fig. 27. — Détails du réducteur de puissance frigorifique du type Linde.

est branché un tuyau dont le volume intérieur peut être agrandi (fig. 26 et 27). Cette soupape isolée ne communique pas avec les soupapes d'aspiration et de compression ; quand elle est ouverte l'aspiration du compresseur se fait d'abord sur la

chambre supplémentaire formée par le tuyau ajouté, avant d'obtenir un vide suffisant pour faire manœuvrer la soupape d'aspiration. Pendant la période de compression, le compresseur devra d'abord remplir ce même tuyau avant que la pression soit assez forte pour ouvrir la soupape de refoulement.

12. — Commande des compresseurs. — Les compresseurs peuvent être actionnés par des moteurs thermiques quelconques ou par des moteurs électriques.

L'accouplement avec le moteur peut être fait soit par courroie ou câble, soit d'une manière directe.

La transmission par courroie ou câble a l'avantage de permettre la commande du compresseur au moyen de petits moteurs à grande vitesse et à rendement élevé. L'inconvénient est l'existence de pertes par transmission. De plus, on ne gagne pas de place, la transmission absorbant celle qu'on économiserait par l'emploi de petits moteurs rapides. De plus, les accélérations et les ralentissements provenant de l'inégale répartition des masses du volant ont pour effet d'allonger les courroies.

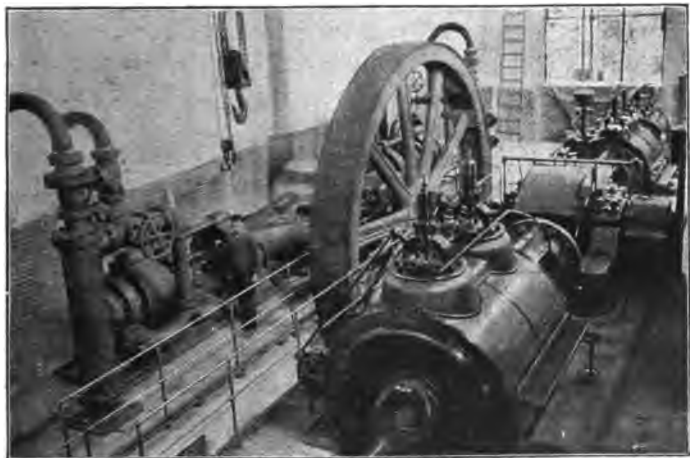
Dans les compresseurs horizontaux, le couplage direct peut se faire de deux manières.

a) Ou bien l'axe du cylindre du compresseur est dans le prolongement de l'axe du cylindre moteur ; c'est le *dispositif en tandem.*

b) Ou bien l'axe du cylindre du compresseur est parallèle à l'axe du cylindre moteur ; *c'est le couplage en parallèle* (fig. 28).

Le dispositif en tandem, bien que procurant une économie de place, est peu employé, parce qu'il n'est pas favorable à la régularité de la marche.

Avec l'accouplement direct, il est généralement nécessaire de munir le volant d'un contre-



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 28. — Compresseur double d'une puissance de 1.200.000 frigories-heure, accouplé directement en parallèle à une machine à vapeur Sulzer à soupapes (installation faite par la maison Sulzer à la Cerveceria Argentina Quilmes à Buenos-Aires).

poids, parce que la résistance à la fin de la compression est plus forte sur la face postérieure du piston que sur la face antérieure ; celle-ci a en effet une surface diminuée de la section de la tige (cas des compresseurs à double effet). Ce contre-poids est d'autant plus nécessaire que le diamètre du cylindre du compresseur est plus petit et la

section de la tige plus grande. On le rencontre surtout dans les machines à anhydride carbonique. Pour les compresseurs horizontaux dans lesquels la pression maxima sur le piston se produit environ au milieu de la course, ce contrepoids doit devancer la manivelle de 90 degrés.

C'est dans ce but que les constructeurs ont été amenés à caler, sous un certain angle, les manivelles du moteur et des compresseurs appliquées à un même arbre moteur.

On peut actionner les compresseurs avec des *moteurs à gaz à explosion ou à combustion*. Si on fait l'accouplement direct, il faut que, pendant la mise en marche du moteur, le compresseur travaille à vide. Il suffit pour cela d'immobiliser les soupapes d'aspiration au moyen d'une vis de serrage, ou d'établir une circulation de décharge, constituée par une communication munie d'un robinet entre la conduite d'aspiration et celle de refoulement ; au démarrage on ouvre le robinet pour le fermer ensuite peu à peu quand le moteur est en marche.

En général, dans la commande par moteurs à explosion, on intercale un renvoi entre le moteur et le compresseur, parce que la vitesse maximum de celui-ci est inférieure à la vitesse minimum admise pour le moteur.

Dans la commande par moteur électrique, il est bon d'établir une transmission par courroie, en plaçant le moteur sur un châssis susceptible de se déplacer de manière à faire varier la tension de la courroie.

13. — La suppression du presse-étoupe et des soupapes. — Nous venons d'étudier les compresseurs ordinaires avec leur presse-étoupe, leurs segments de piston, leurs clapets, etc... Le presse-étoupe et les segments du piston offrent des résistances passives d'autant plus considérables que l'appareil est plus petit ; il en résulte que le rendement effectif des machines diminue beaucoup dans les petits modèles.

MM. Audiffren et Singrün ont supprimé le presse-étoupe, les segments de piston et les clapets. Ils emprisonnent le compresseur dans une enceinte hermétiquement close à l'intérieur de laquelle s'exerce la pression du liquéfacteur (fig. 29). Le compresseur peut être actionné par un moteur extérieur sans percer la paroi de la cavité qui le contient, c'est-à-dire sans employer de presse-étoupe. Il suffit pour cela de faire tourner le réservoir clos contenant le compresseur. Le mécanisme de celui-ci, animé d'un mouvement alternatif, est maintenu fixe dans l'espace grâce à une masse de plomb suffisamment lourde qui leste le carter contenant la pompe du compresseur.

L'appareil se compose de deux carters sphériques réunis par un arbre creux ; l'un joue le rôle d'évaporateur, l'autre celui de liquéfacteur. Dans celui-ci se trouve logé le mécanisme compresseur. Le mouvement de rotation des deux carters ainsi que le mouvement alternatif du compresseur sont commandés par une poulie extérieure. Le cylindre C du compresseur est oscillant sur deux tourillons t_1 et t_2 ; il est muni

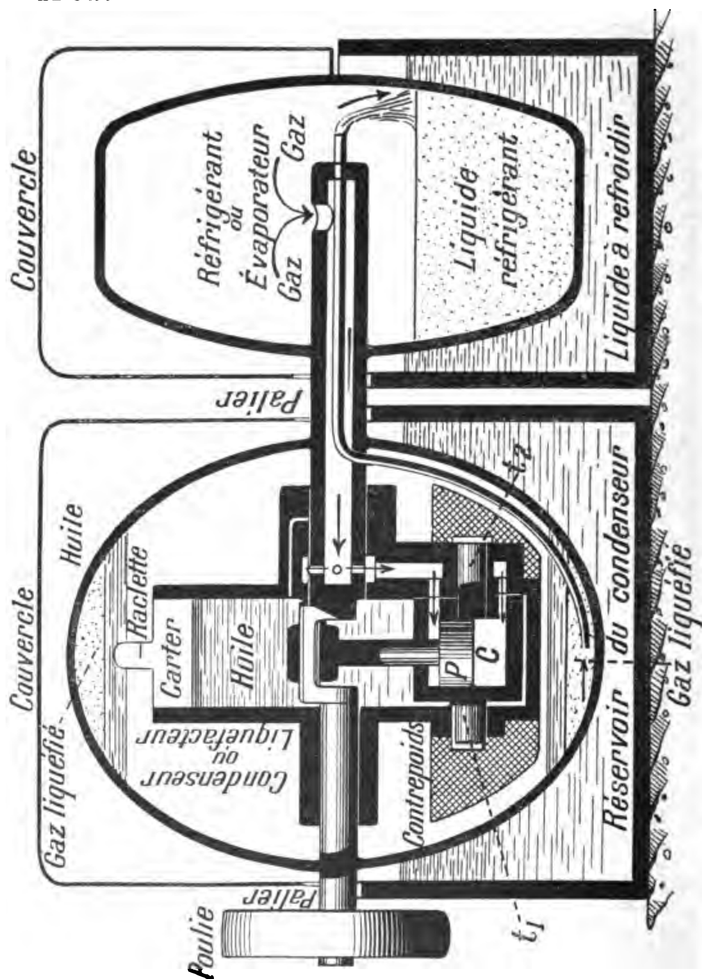


Fig. 29. — Coupe de la machine frigorifique Audiffren et Singrün.
C, cylindre du compresseur ; p, piston du compresseur ; t_1, t_2, tourillons du cylindre oscillant C.

d'un piston massif P sans segments. Le mouvement oscillatoire du cylindre découvre alternativement des orifices permettant au fluide de l'évaporateur de pénétrer au-dessus et au-dessous du

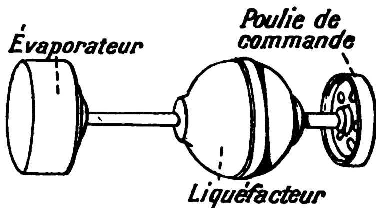


Fig. 30. — Vue extérieure du frigorigène Audiffren-Singrün.

piston. Celui-ci, actionné par un arbre coudé, aspire les vapeurs dans l'évaporateur et les refoule dans le carter-condenseur : ces vapeurs s'y liqué-

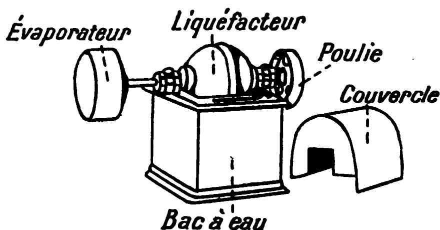


Fig. 31. — Montage du frigorigène Audiffren-Singrün.

fient à la périphérie où les porte le mouveent de rotation ; elles reviennent ensuite à l'évaporateur comme le montre la figure 29. Le compresseur fonctionne complètement immergé dans un bain d'huile chimiquement neutre, qui remplit les vides et les espaces nuisibles, empêche l'usure,

et combat l'échauffement par son refroidissement constant sur les parois du condenseur. Le liquide

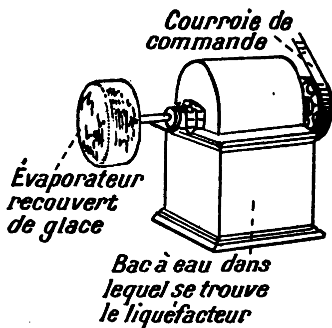


Fig. 32. — Frigorigène Audiffren-Singrün complètement monté et en fonctionnement.

frigorigène projeté à la périphérie se sépare de l'huile par différence de densité.

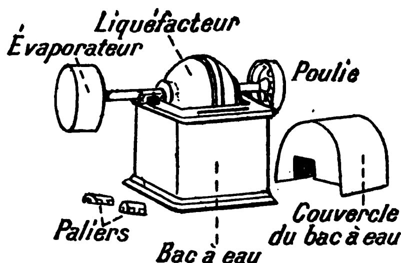


Fig. 33. — Montage d'un frigorigène Audiffren-Singrün.

Le compresseur cesse de fonctionner, quand le contrepoids est entraîné dans le mouvement de rotation. Il en est ainsi pour une pression fixée d'avance et par suite pour une élévation

déterminée de la température du condenseur. Les figures 30, 31, 32, 33, montrent l'aspect intérieur de la machine, ainsi que la couche de glace qui se dépose sur les parois de l'évaporateur, quand on le fait tourner dans de l'eau douce. Cette glace, qui peut être détachée automatiquement de la périphérie de l'évaporateur. est d'une transparence parfaite, quelle que soient les eaux douces employées.

§ 3. — Le Liquéfacteur.

1. — But du liquéfacteur. — Le *liquéfacteur* a pour but de faire passer à l'état liquide et de refroidir le fluide comprimé qui vient du compresseur. Il se compose de tuyaux, à l'intérieur desquels circule le fluide frigorigène, et qui sont refroidis extérieurement.

Le fluide pénètre à l'état surchauffé ; il se refroidit jusqu'à la température correspondant à la pression de liquéfaction. Il passe alors à l'état liquide. Enfin, il se refroidit. Le liquéfacteur joue donc le triple rôle de refroidisseur de vapeur, de liquéfacteur de vapeur, de refroidisseur de liquide condensé.

2. — Liquéfacteurs à immersion. Liquéfacteurs à ruissellement. — On distingue deux types de liquéfacteurs. Dans les uns le serpentin est plongé dans l'eau qui circule extérieurement autour de lui ; ce sont les *liquéfacteurs à immersion* (fig. 34). Dans les autres l'eau ruisselle sur les parois extérieures ; sous l'action d'une ventilation

convenable, cette eau passe à l'état de vapeur en produisant une absorption de chaleur et un re-

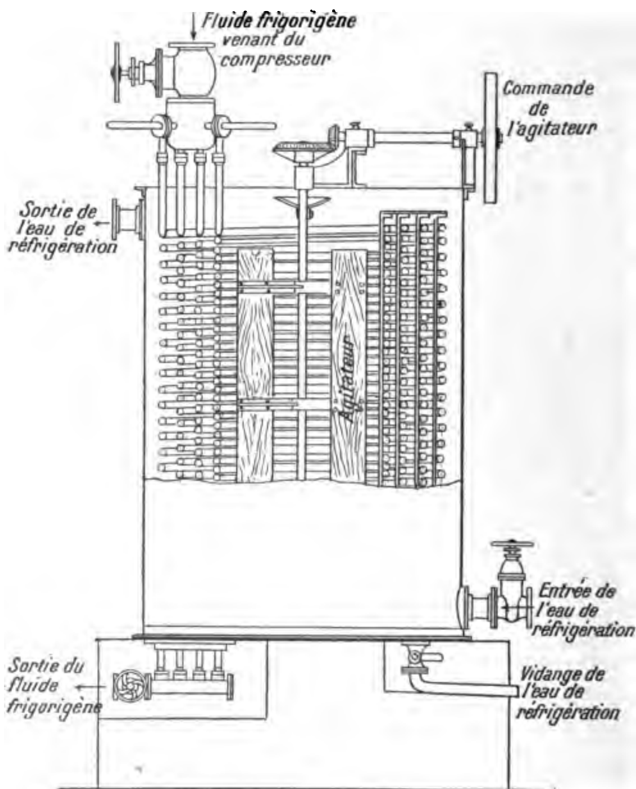


Fig. 34. — Liquéfacteur à immersion (construction Pictet).

froidissement des tuyaux du liquéfacteur : les liquéfacteurs de ce type sont dits à *ruissellement* (fig. 35).

3. — Construction des liquéfacteurs à immersion. — Dans les *liquéfacteurs à immersion*, la circulation d'eau froide et celle du fluide frigorigène doivent réaliser le principe du contre-courant. L'eau froide entre du côté de la sortie du fluide



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).
Fig. 35. — Liquéfacteur à ruissellement.

et sort du côté où entre celui-ci ; elle refroidit d'abord le liquide formé, puis liquéfie la vapeur à l'état de saturation, enfin refroidit la vapeur surchauffée.

Afin de ne pas opposer à la circulation du fluide frigorigène une trop grande résistance, on partage le liquéfacteur en divers serpentins de même résistance que l'on monte en parallèle, les orifices d'entrée et de sortie débouchant dans des

collecteurs; ceux-ci assurent une distribution aussi uniforme que possible du fluide. Les brides raccordant les divers tuyaux au collecteur doivent être facilement accessibles et situées hors de l'eau de refroidissement.

Les divers serpentins qui composent un liquéfacteur sont, pour éviter l'encombrement, disposés de manière à s'envelopper réciproquement. Il est alors nécessaire de faire écouler l'eau de réfrigération de manière à utiliser au mieux les surfaces d'échange de chaleur et à faire en sorte que tous les serpentins aient un effet uniforme. On y parvient en actionnant un agitateur (agitateur à palettes ou mieux hélice) placé dans la partie centrale à l'intérieur des spires. On obtient un meilleur résultat en disposant dans cette région un cylindre creux en tôle, de la base duquel l'eau s'échappe tangentiellement, s'élève dans la couronne formée par le cylindre et l'enveloppe extérieure en suivant la courbure des serpentins; enfin, déborde par le haut dans un déversoir annulaire : de cette façon le mouvement ascensionnel hélicoïdal de cette eau n'est interrompu à aucun moment.

Les serpentins des liquéfacteurs à ammoniaque et à anhydride sulfureux sont généralement en fer étiré de 30 à 40 millimètres de diamètre intérieur, avec des parois de 5 à 6 millimètres d'épaisseur. Les serpentins en acier des machines à anhydride carbonique, éprouvés à 200 atmosphères, ont 25 millimètres de diamètre intérieur et 5 à 7 millimètres d'épaisseur. On construit également pour les machines à anhydride sulfu-

reux et à anhydride carbonique des serpentins en cuivre étiré sans soudure ayant de 3 à 5 millimètres d'épaisseur. Le diamètre de spire d'un serpentin ne doit pas être inférieur à 400 millimètres ; la longueur de chaque serpentin ne doit pas dépasser 150 mètres.

Quelle est la surface d'échange que l'on doit donner à un liquéfacteur à immersion si une machine fonctionne dans les conditions normales [— 10°C. à l'évaporateur ; + 25°C. et + 15°C. dans le liquéfacteur ; + 12° pour l'eau à l'entrée du liquéfacteur et + 20° pour l'eau à la sortie ; différence moyenne de 9° entre le fluide et l'eau]. On considère qu'il faut, pour une production de 1.000 frigories-heure 1^{m2} à $1^{m2},1$ de surface intérieure des tuyaux dans les machines à ammoniaque et à anhydride sulfureux — et $1^{m2},5$ à $1^{m2},6$ de surface intérieure des tuyaux dans les machines à anhydride carbonique, à cause de la très forte surchauffe.

Si une machine de 100.000 frigories-heure fonctionne dans les conditions indiquées plus haut, il faut la munir d'un liquéfacteur ayant une surface intérieure égale à 105 mètres carrés, s'il s'agit d'une machine à ammoniaque ou à anhydride sulfureux — et une surface intérieure égale à 155 mètres carrés, s'il s'agit d'une machine à anhydride carbonique. Admettons qu'il s'agisse d'une machine à ammoniaque, dont le liquéfacteur est fait de tuyaux en fer ayant 30 millimètres de diamètre intérieur. Ces tuyaux ont, au mètre courant, une surface intérieure égale à $0^{m2},094$; leur longueur totale sera donc, dans le cas actuel

$\frac{105}{0,094}$ = **1.117** mètres environ, soit 7 à 8 serpentins.

4. — Liquéfacteurs à doubles tuyaux. — Quelques

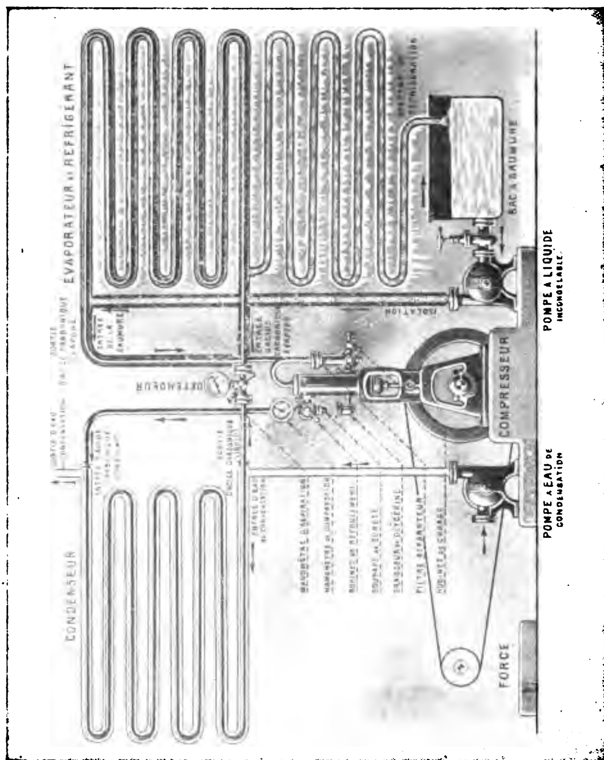
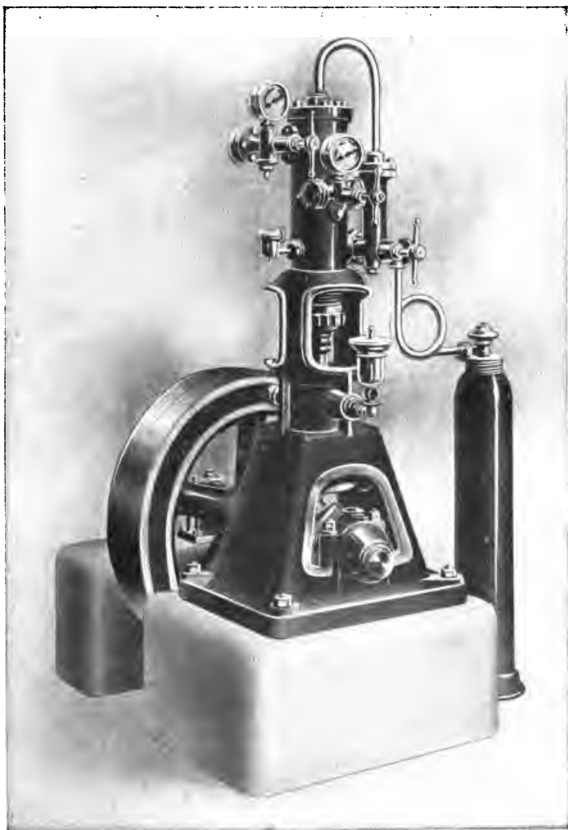


Fig. 36. — **Schéma d'une machine à acide carbonique fonctionnant avec liquéfacteur ou condenseur et évaporateur à doubles tuyaux.**

Cliché de la Société française d'Installations Frigorifiques à Paris.

constructeurs emploient un système particulier de liquéfacteur à contre-courant, c'est le *liquéfacteur à doubles tuyaux*. Dans ce système, le serpentin est composé de tuyaux intérieurs l'un à

l'autre ; les différentes spires sont agencées de

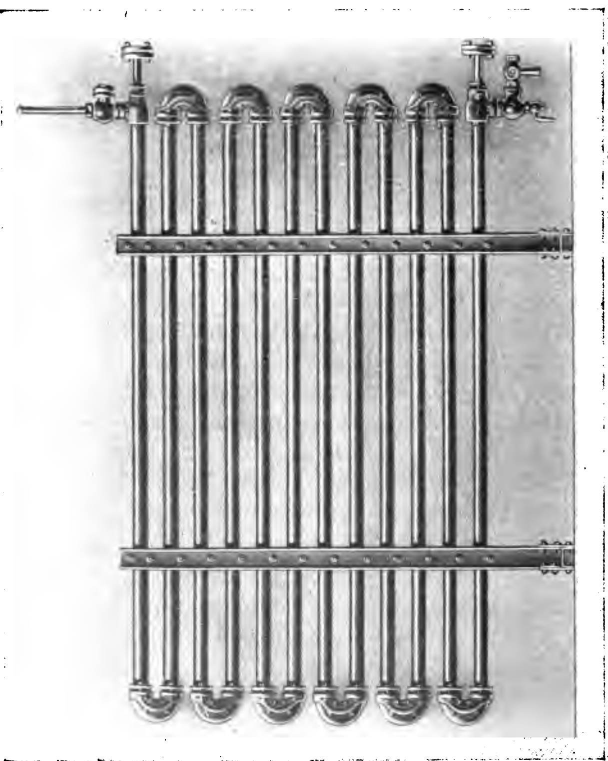


Cliché de la Société française d'Installations Frigorifiques à Paris.

Fig. 37. — Compresseur vertical à acide carbonique de la Société française d'Installations Frigorifiques (représenté dans le schéma précédent).

manière à former un mur vertical. Le fluide se

répand, soit dans l'espace annulaire compris entre les tuyaux, soit dans le tuyau intérieur; l'eau de refroidissement circule, soit dans le tuyau inté-



Cliché de la Société française d'Installations Frigorifiques à Paris.

Fig. 38. — Liquéfacteur à doubles tuyaux et à contre-courant de la Société française d'Installations Frigorifiques.

rieur, soit dans l'espace annulaire. Le fluide entre chaud à la partie supérieure du liquéfacteur et sort à la partie inférieure à l'état de liquide refroidi ; l'cau de refroidissement arrive au con-

traire fraîche à la partie inférieure pour sortir à la partie supérieure. Afin de diminuer la résistance à l'écoulement du fluide dans l'espace annulaire, on fait souvent arriver le fluide chaud venant du compresseur non à l'une des extrémités d'un tuyau, mais au milieu de celui-ci. Le fluide peut alors pénétrer dans les deux espaces annulaires situés de part et d'autre du tuyau de refoulement du condenseur ; l'espace annulaire, qui est ainsi offert à la circulation du liquide a dès lors une section double de l'espace annulaire géométrique existant entre les tuyaux. Ce type de liquéfacteur à doubles tuyaux, est employé surtout dans les machines à ammoniaque et à anhydride sulfureux ; il a le grave défaut de présenter un très grand nombre de joints qui ne tardent pas à perdre leur étanchéité par suite de l'inégale dilatation des tuyaux intérieurs et extérieurs. Cependant la *Société française d'Installations frigorifiques* à Neuilly-sur-Seine, construit pour ses machines à anhydride carbonique un condenseur à doubles tuyaux (fig. 36, 37 et 38). Celui-ci est constitué par des tubes rectilignes en acier, étirés à froid sans soudure et assemblés par des coudes démontables très ingénieusement combinés pour éviter les fuites.

5. — **Liquéfacteur-récipient**. — Certains constructeurs américains tendent à donner une troisième forme au liquéfacteur à contre-courant ; celle-ci est désignée sous le nom de *liquéfacteur-récipient*. Celui-ci a la forme extérieure d'un cylindre comme le liquéfacteur à immer-

sion. Il contient un ou plusieurs serpentins à son intérieur. Mais c'est l'eau de réfrigération qui circule dans les serpentins intérieurs, tandis que le fluide se condense et se refroidit dans le cylindre extérieur (fig. 39). A cause de la grande section de celui-ci, la vitesse du fluide y est très faible, d'où un contact intime entre le fluide et la surface des serpentins à circulation d'eau. Avec les machines à ammoniaque, le cylindre extérieur est en fonte épaisse. Ce type de liquéfacteur permet de réduire au minimum le nombre des joints soumis à la pression régnant dans le liquéfacteur ; ces joints, qui se trouvent sur les couvercles supérieur et inférieur fermant le cylindre en fonte extérieur, peuvent être rendus bien étanches, car ils ne travaillent ni à l'expansion, ni à la contraction.

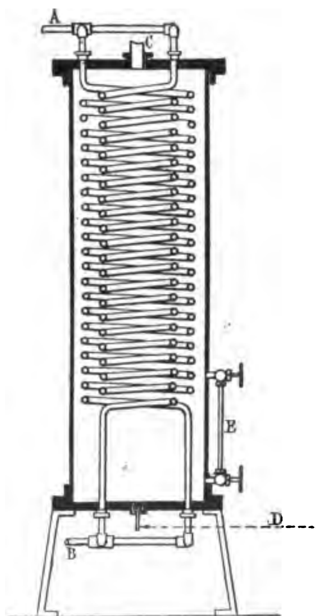


Fig. 39. — Liquéfacteur-récipient.

A, B, entrée et sortie de l'eau de réfrigération ; C, entrée du liquide frigorigène ; E, niveau permettant de juger le niveau du liquide frigorigène.

Les liquéfacteurs tubulaires, employés dans quelques machines à anhydride sulfureux, repré-

sentent une variété de liquéfacteurs-récipients. Ils sont analogues aux chaudières tubulaires des locomotives ; le fluide se condense et se refroidit en circulant à l'intérieur de tuyaux droits baignés dans l'eau de réfrigération.

6. — **Défauts des liquéfacteurs à immersion**. — Les liquéfacteurs à immersion exigent beaucoup d'eau. Autour du serpentin du liquéfacteur d'une machine à ammoniaque de 100.000 frigories-heure, fonctionnant dans les conditions indiquées plus haut, il faut faire circuler par heure de 140 à 150 hectolitres d'eau. Cette eau doit être claire ; les dépôts de vase sur les spires extérieures des serpentins diminuent l'efficacité des surfaces d'échange ; leur nettoyage est très difficile. Même avec de l'eau claire, il se forme souvent des gaines d'air sur les faces extérieures des serpentins, ce qui contribue encore à en diminuer l'efficacité. Enfin les fuites des serpentins sont difficiles à découvrir.

7. — **Liquéfacteurs à ruissellement**. — Quand on dispose d'une petite quantité d'eau de réfrigération ou quand celle-ci n'est pas claire, il convient d'employer les *liquéfacteurs à ruissellement* (fig. 40 et 41).

Un tel appareil se compose d'une série de tuyaux généralement horizontaux formant un mur. L'eau froide sort d'une gouttière située au-dessus des tuyaux et ruisselle le long des spires. L'eau, à l'exception de celle qui se perd et s'évapore, est recueillie dans un bac placé à la partie

inférieure du mur. Une pompe la remonte dans la gouttière supérieure. On a toujours soin de remplacer l'eau perdue. Le fluide comprimé venant du compresseur pénètre par le haut du mur ; le liquide refroidi est recueilli à la partie inférieure. Ce dispositif ne réalise pas le principe du contre-courant ; mais son application présente moins d'intérêt dans le cas actuel ; même en appliquant le contre-courant, l'eau ne

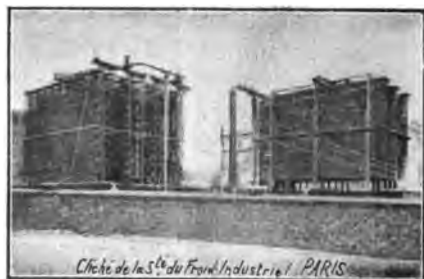


Fig. 40. — Liquéfacteur à ruissellement.

s'échaufferait que fort peu par suite de son évaporation partielle.

Il convient de réaliser une utilisation aussi parfaite que possible de l'eau de condensation. Lorsqu'on dispose d'une quantité suffisante d'eau : on diminue la hauteur du mur formé par les serpentins et on augmente sa largeur (diminution du nombre des spires au profit de la longueur des tuyaux) ; en cas de pénurie d'eau, au contraire, on accroît la hauteur du mur formé par les serpentins et on diminue sa largeur (augmentation du nombre des spires).

La distribution de l'eau doit être d'autre part aussi régulière que possible ; il convient d'éviter qu'il se produise des éclaboussures.

Comme dans le liquéfacteur à immersion, le fluide doit être réparti aussi uniformément que possible dans chacun des serpentins.



Fig. 41. — Liquéfacteur à ruissellement de la Société du Froid Industriel à Paris.

Ceux-ci doivent d'ailleurs être disposés de manière à permettre un nettoyage facile de leur surface extérieure.

Il importe enfin que les serpentins se replient suivant un rayon de courbure assez grand, afin que l'effort sur la ligne de suture des tuyaux ne soit pas trop considérable : la distance d'axe en axe des tuyaux est généralement égale à 150 millimètres (rayon de cintrage égal à 75 millimètres environ).

On favorise l'évaporation de l'eau de réfrigération, en utilisant l'action des vents c'est-à-dire en plaçant le liquéfacteur sur un toit ou un écha-

faudage et orientant les serpentins dans la direction des vents dominants.

On améliore l'efficacité de la surface d'échange entre le fluide et le milieu extérieur en empêchant la stagnation du liquide frigorigène dans les tuyaux ; pour cela on produit un certain écoulement de ce liquide par une pente continue convenable donnée à ces tuyaux.

Les tuyaux des liquéfacteurs à ruissellement sont les mêmes que ceux des liquéfacteurs à immersion.

Au sujet de la circulation minima de l'eau d'arrosage des tuyaux, on compte 2 litres à $2^l,5$ par seconde et par mètre courant du tuyau supérieur du serpentin. Si, pour une machine à ammoniaque de 100.000 frigories-heure fonctionnant dans les conditions normales indiquées plus haut, on emploie des tuyaux de 6 mètres de longueur, il faut déverser par heure

$$2,25 \times 6 \times 36 = \mathbf{486} \text{ hectolitres d'eau.}$$

On compte environ 10 p. 100 de cette eau dont le renouvellement est nécessaire, soit environ 50 hectolitres d'eau par heure. Pour une même puissance frigorifique produite, la consommation d'eau d'un liquéfacteur à ruissellement est à peu près le tiers de la consommation d'eau d'un liquéfacteur à immersion.

8. — Liquéfacteur à ruissellement et refroidisseur de liquide. — Quand on fonctionne à forte surchauffe, on adjoint généralement au liquéfacteur à ruissellement un refroidisseur du liquide frigori-

gène (fig. 42). Ce dernier est un liquéfacteur à immersion, dont la cuve contenant le serpentin refroidisseur est fermée. L'eau réfrigérante circule d'abord sous pression dans le refroidisseur

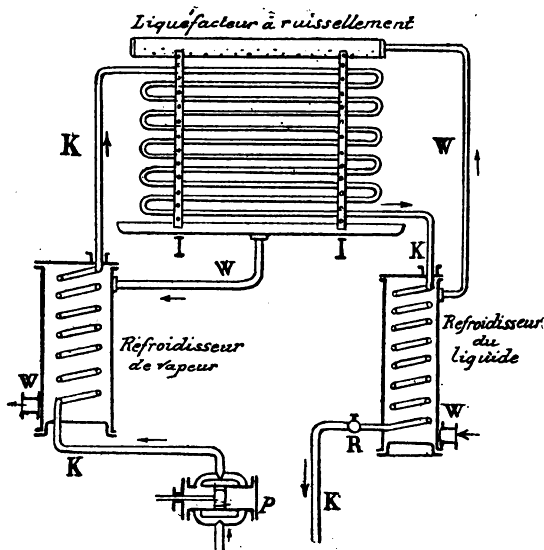


Fig. 42. — Liquéfacteur à ruissellement avec refroidisseur de vapeur et refroidisseur de liquide.

W, circulation de l'eau de réfrigération ; K, circulation du liquide frigorigène ; P, compresseur ; R, robinet.

de liquide avant de s'élever jusqu'à la gouttière du liquéfacteur à ruissellement.

§ 4. — Le réfrigérant ou évaporateur.

La construction du *réfrigérant* ou *évaporateur* dépend de l'application que l'on veut faire

du froid. Ce mode de construction sera étudié plus loin dans le chapitre relatif à l'entrepôt frigorifique.

Nous indiquerons seulement ici que, dans cette construction, on doit satisfaire à un certain nombre de conditions, parmi lesquelles nous citerons :

a) *L'utilisation la plus parfaite possible des surfaces d'échange de chaleur ;*

b) *La moindre déperdition de froid ;*

c) *L'étanchéité absolue ;*

d) *La possibilité d'exécuter rapidement et facilement des réparations, ainsi que les nettoyages intérieur et extérieur ;*

e) *L'économie de place et de prix de revient.*

Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, l'efficacité des surfaces d'échange de chaleur dans l'évaporateur est d'autant plus grande que celui-ci contient plus de liquide en mouvement. Il importe de ne laisser se produire en aucun point de cet évaporateur des poches de vapeur surchauffée ou simplement sèche.

La diminution de la déperdition du froid est obtenue par un isolement convenable de l'évaporateur.

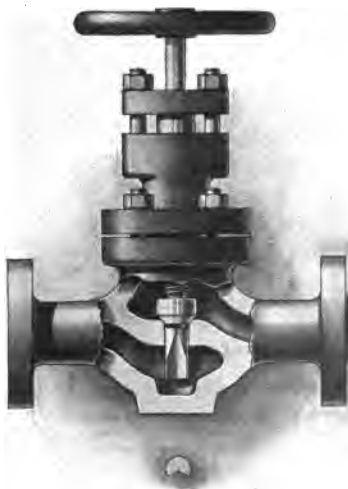
Le froid produit dans l'évaporateur peut être transmis du fluide frigorigène soit à de l'air, soit à une dissolution saline.

La solution salée ou *saumure* est faite, soit avec du chlorure de calcium, soit avec du chlorure de magnésium, soit avec du chlorure de sodium. Elle ne doit, aux températures auxquelles elle est soumise, ni se congeler, ni former des dépôts susceptibles d'entraver la circulation

de cette saumure ; elle ne doit donc être ni trop diluée, ni trop saturée.

§ 5. — Disposition générale d'une installation.

1. — **Conduites.** — Les conduites, qui relient entre eux le compresseur, le liquéfacteur et l'évapora-



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 43. — Vanne de réglage ou de régulation (construction Sulzer).

La vanne est à queue cylindrique fraisée d'une manière spéciale, afin d'avoir des sections de passage suffisamment faibles, donnant un écoulement bien régulier du fluide frigorigène.

teur, sont généralement en acier ; seuls les raccords cintrés sont en fonte ou en fer forgé. On emploie aussi du cuivre pour les conduites des installations à anhydride sulfureux.

Toutes les conduites doivent être soigneusement

isolées, afin d'éviter autant que possible les échanges de chaleur avec le milieu extérieur et notamment les déperditions de froid.

Le diamètre intérieur de ces conduites se détermine en prenant une vitesse moyenne de circula-

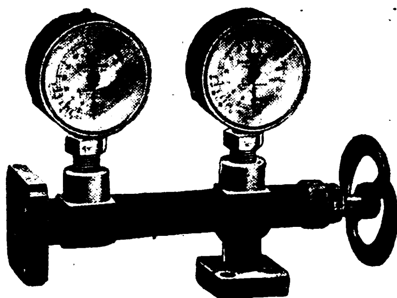


Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 44. — Vanne de réglage de précision (construction Sulzer).

Cette vanne destinée à obtenir un réglage très précis (notamment pour les serpentins d'évaporation de grands générateurs ou réfrigérateurs d'air), est manœuvrée à l'aide d'une vis sans fin indiquant exactement au moyen de la graduation visible sur la figure les dimensions de l'orifice de passage.

tion égale à 10 mètres par seconde pour l'anhydride carbonique et à 15 mètres par seconde pour l'ammoniaque et l'anhydride sulfureux. Le produit de la section d'une conduite par cette vitesse est égal au volume de fluide qui traverse cette section de la conduite dans l'unité de temps. Ce volume est connu d'autre part, quand on sait quel est le volume du compresseur et son nombre de tours par minute.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 45. — Vanne de régulation des machines à acide carbonique de la Société du Froid Industriel (avec les manomètres de refoulement à droite et d'aspiration à gauche).



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 46. — Filtre séparateur de l'eau contenue dans l'acide carbonique (séparation sous forme de glace) muni de son robinet d'arrêt à l'aspiration (construction de la Société du Froid Industriel).

2. — Vanne de régulation. Robinet de compression. Soupape de sûreté. — Entre le liquéfacteur et l'évaporateur se trouve la *vanne de régulation*. Elle est constituée souvent par un simple robinet à pointeau. Les figures 43, 44, 45 montrent des types de ces vannes.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 47. — Robinet de compression portant la soupape de sûreté. (Machine à acide carbonique de la Société du Froid Industriel.)

Le *robinet de compression* (à volant) sert à isoler le compresseur du liquéfacteur et permet de faire la visite du compresseur et de ses accessoires sans perdre de fluide frigorigène.

La *soupape de sûreté* (à gauche) est formée d'un disque en cuivre, qui se fend lorsque la pression dans le compresseur atteint le double de la pression de régime. Ce disque est maintenu en place par un chapeau vissé portant des trous par lesquels s'échappe l'acide carbonique lors d'une rupture du disque de cuivre.

Les machines à acide carbonique portent un filtre (fig. 46) destiné à arrêter l'eau contenue dans la bouteille qui alimente la machine ; cette eau se congèle quand on introduit le fluide frigorigène dans la machine ; le filtre empêche cette glace de pénétrer dans la machine. Un certain nombre de compresseurs portent également un robinet

capable d'isoler le compresseur du liquéfacteur (fig. 47) et une soupape de sûreté (fig. 47 et 12 *bis*).

3. — Positions relatives de l'évaporateur et du liquéfacteur. — Entre la vanne de régulation et l'éva-

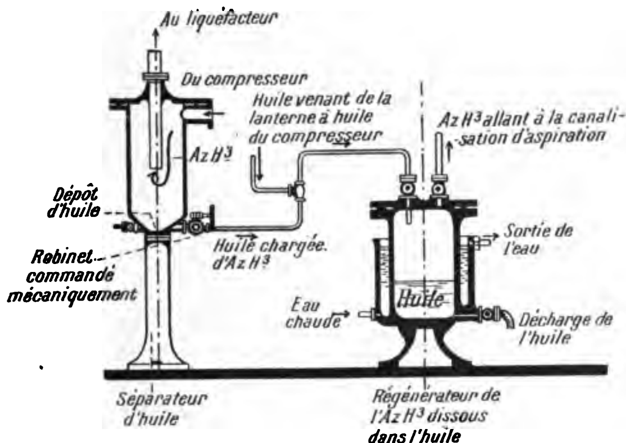


Fig. 48. — Machine à ammoniaque. Séparateur d'huile et distillateur d'huile ayant dissous du gaz ammoniacal.

porateur, la circulation du fluide ne doit pas tantôt monter et tantôt descendre. En effet, dans la conduite qui va du liquéfacteur à la vanne de régulation, le fluide frigorigène est liquide ; au delà de la vanne de régulation vers l'évaporateur, ce fluide est un mélange de liquide et de vapeur, pour lequel il ne faut pas attendre des effets de siphon. Le mieux est donc de disposer toujours l'évaporateur en contrebas du liquéfacteur.

4. — Séparateur d'huile et Rectificateur des machines

à ammoniaque. — Les installations à ammoniaque

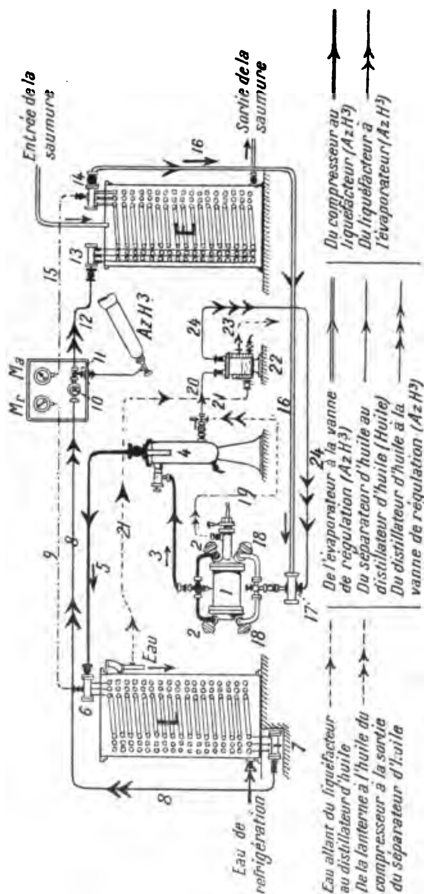


Fig. 49. — Schéma d'une installation frigorifique avec compresseur à ammoniaque.

1, *compresseur* ; 2, 2, soupapes de refoulement ; 3, du compresseur au séparateur d'huile ; 4, *séparateur d'huile* ; 5, du séparateur d'huile au liquéfacteur ; 6, entrée du fluide frigorigène dans le serpentin du liquéfacteur ; L, *serpentin du liquéfacteur* ; 7, sortie du fluide frigorigène du serpentin du liquéfacteur ; 8, du liquéfacteur à la vanne de regulation ; 9, du liquéfacteur au manomètre M_r ; 10, *vanne de régulation* ; 11, raccord avec robinet de la bouteille à ammoniaque ; 12, de la vanne de régulation à l'évaporateur ; 13, entrée du fluide frigorigène dans le serpentin de l'évaporateur E ; E, *serpentin de l'évaporateur* ; 14, sortie du fluide frigorigène de l'évaporateur ; 15, de l'évaporateur au manomètre M_a ; 16, 17, de l'évaporateur aux soupapes d'aspiration ; 18, 18, soupapes d'aspiration ; 19, huile allant de la lanterne à huile du compresseur au distillateur d'huile ; 20, huile allant du séparateur d'huile au distillateur d'huile ; 21, eau chaude sortant du liquéfacteur et allant au distillateur d'huile ; 22, *distillateur d'huile* ; 23, eau sortant du distillateur d'huile ; 24, gaz ammoniac se rendant du distillateur d'huile aux soupapes d'aspiration (par erreur le raccord 17 a été dénommé sur la figure vanne de régulation.

se distinguent des autres par la présence entre le compresseur et le liquéfacteur d'un *séparateur*

d'huile, relié à un *rectificateur* (fig. 48). L'ammoniaque jouit en effet de la propriété de se dissoudre dans l'huile de graissage. Il y aurait donc de ce fait des pertes importantes de fluide, si l'on ne prenait pas soin de faire passer de temps en

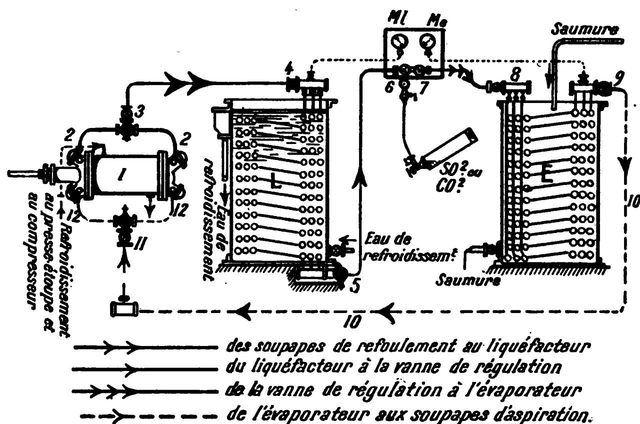


Fig. 50. — Schéma d'une installation de machine frigorifique à anhydride sulfureux ou à acide carbonique.

1, *compresseur* ; 2, 2, soupapes de refoulement ; 3, du compresseur au liquéfacteur ; 4, entrée du fluide frigorigène dans le liquéfacteur ; L, serpentin *du liquéfacteur* ; 5, sortie du fluide frigorigène du liquéfacteur ; 6, raccord aux robinets de la tuyauterie de la bouteille à CO^2 ou SO^2 ; 7, *vanne de régulation* ; 8, entrée du fluide frigorigène dans l'évaporateur ; E, serpentin de *l'évaporateur* ; 9, sortie du fluide frigorigène de l'évaporateur ; 10, de l'évaporateur aux soupapes d'aspiration ; 12, 12, soupapes d'aspiration ; M_l, manomètre du liquéfacteur ; M_a, manomètre de l'évaporateur.

temps l'huile du séparateur dans un vase autour duquel circule de l'eau chaude ; le gaz ammoniac dégagé se rend dans la conduite d'aspiration.

Les figures 49 et 50 montrent l'ensemble d'une installation à ammoniaque et d'une installation fonctionnant soit à l'anhydride sulfureux, soit à l'anhydride carbonique.

CHAPITRE II

LA MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION

1. — Fonctionnement d'une machine à absorption. Type à ammoniaque. — Nous avons indiqué, dans l'Introduction, le principe de cette machine. Le liquéfacteur et l'évaporateur ne diffèrent pas de ceux des machines à compression ; mais le fluide frigorigène, pour passer de l'évaporateur dans le liquéfacteur, est dissous à basse température dans un liquide approprié, puis dégagé de cette dissolution à température plus élevée.

Presque toutes les machines à absorption fonctionnent avec l'ammoniaque comme fluide frigorigène et l'eau comme dissolvant. Sous une pression déterminée, l'eau dissout d'autant plus de gaz ammoniac que sa température est plus basse ; c'est ainsi que, sous la pression de l'atmosphère, 1 kilogramme d'eau dissout 380 grammes d'ammoniaque à 50° et 900 grammes à zéro. Or, dans les machines à absorption, on utilise le même liquide dissolvant, une dissolution ammoniacale, qui passe d'une température élevée à laquelle elle dégage la plus grande partie de son gaz, à une température basse à laquelle elle

absorbe une nouvelle quantité de gaz provenant de l'évaporateur. La première solution dégage son gaz dans le ***bouilleur***; elle s'y ***appauvrit*** et doit

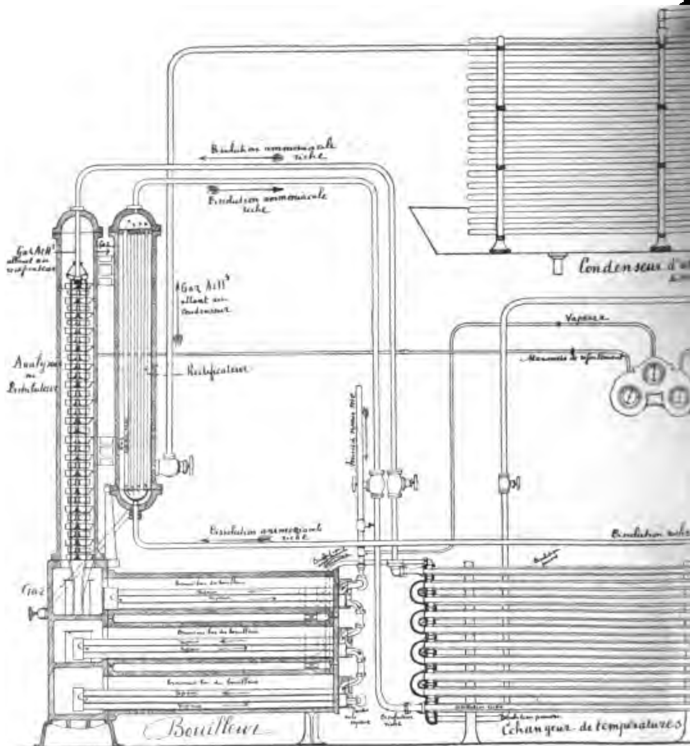
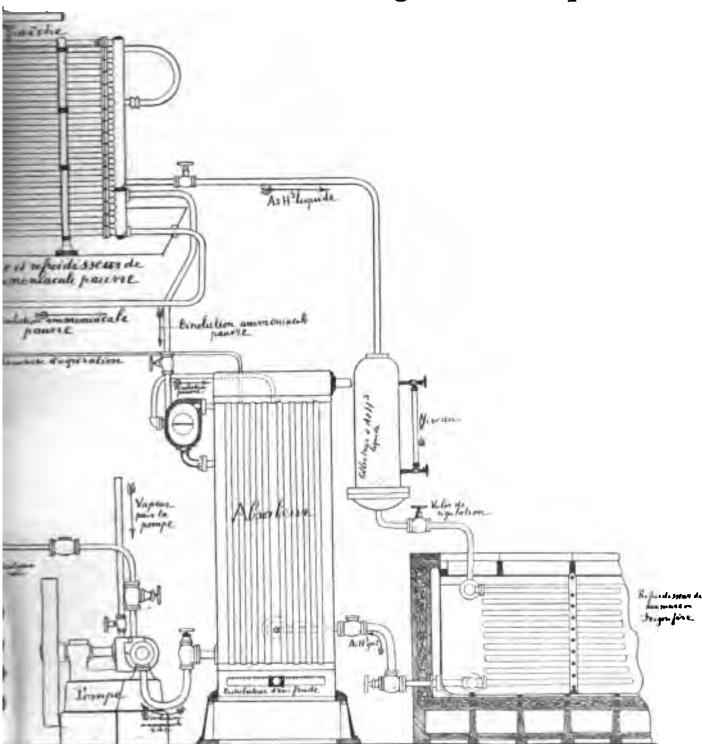


Fig. 51. — Schéma d'une installation

être refroidie avant de passer dans ***l'absorbeur*** où elle ***s'enrichit*** de nouveau en gaz ammoniac. Tandis que la ***solution pauvre*** doit être refroidie, la ***solution riche*** doit être réchauffée. On a

intérêt à réaliser entre la solution pauvre chaude et la solution riche froide le principe du contre-courant dans un *échangeur de températures,*



ıchine frigorifique (AzH³) à absorption.

permettant sans dépense de calories produites à l'extérieur de la machine, d'élever là température de la solution riche et d'abaisser celle de la solution pauvre.

Le gaz ammoniac chaud sortant du bouilleur est chargé de vapeur d'eau, dont il convient de le séparer avant de l'envoyer dans le liquéfacteur. On utilise encore ici le principe du contre-courant en faisant circuler en sens inverse et mettant en contact par l'intermédiaire de parois métalliques, d'une part le gaz chaud et d'autre part la solution riche allant de l'absorbeur au bouilleur. L'appareil dans lequel se produit un tel contact est le *rectificateur ;* le gaz ammoniac y condense sa vapeur d'eau et se refroidit en réchauffant la solution riche.

Enfin, l'échauffement de cette solution se complète, avant son entrée dans le bouilleur, dans un appareil dénommé *distributeur*. La solution riche, tombant de haut en bas en cascade sur des plateaux convenablement disposés, rencontre le gaz ammoniac chaud, qui sort de la chaudière et s'élève dans le distributeur. Là encore il y a échauffement de la solution riche.

Une installation de machine frigorifique à absorption se compose donc des appareils suivants (fig. 51) :

1° *Un bouilleur*, dans lequel se dégage le gaz ammoniac d'une solution riche. Il est chauffé par une source extérieure, généralement de la vapeur d'eau venant d'une chaudière.

2° *Un distributeur*, que traversent dans des sens inverses le gaz ammoniac chaud, chargé de vapeur d'eau, et une solution riche. Son rôle est de réchauffer la solution riche avant son entrée dans le bouilleur, et par suite de réduire la

dépense de chaleur fournie de l'extérieur au bouilleur.

3° *Un rectificateur*, que traversent en sens inverse le gaz ammoniac chaud, chargé de vapeur d'eau, et la solution riche. C'est un réchauffeur de celle-ci, en même temps qu'un refroidisseur du gaz et un condenseur de sa vapeur d'eau.

4° *Un échangeur de températures*, dans lequel viennent en contact au travers d'une paroi métallique et circulent dans des sens inverses, la solution riche froide venant de l'absorbeur et du rectificateur et allant au bouilleur, et la solution pauvre chaude venant du bouilleur et allant à l'absorbeur.

5° *Une pompe* aspirant la solution riche formée dans l'absorbeur et la refoulant dans le rectificateur et l'échangeur de températures.

6° *Un absorbeur*, dans lequel le gaz ammoniac venant de l'évaporateur se dissout dans la solution pauvre venant de l'échangeur de températures. Le gaz et la solution pauvre cheminent dans des sens inverses. Un courant d'eau extérieur absorbe la chaleur dégagée dans la dissolution et maintient celle-ci à une température suffisamment basse.

L'absorbeur est en relation avec l'évaporateur.

7° Le reste de l'installation comprend un *évaporateur, une vanne de régulation*, un *liquéfacteur*.

On peut, de la manière suivante, représenter les séries de transformations du fluide frigorigène et de la dissolution.

	CIRCUIT DU FLUIDE FRIGORIGÈNE	CIRCUIT DE LA SOLUTION	
Solution riche du gaz frigorigène dans l'eau.	Evaporateur (vaporisation).	Absorbeur.	Solution riche.
	Absorbeur (dissolution dans l'eau, formation de la solution riche).	Pompe à solution riche.	
	Pompe à solution riche.	Echangeur de températures ou rectificateur.	
	Echangeur de températures ou rectificateur.	Rectificateur ou échangeur de températures.	
	Rectificateur ou échangeur de températures.	Distributeur.	
	Distributeur.	Bouilleur.	
	Bouilleur.		
Fluide frigorigène.	Distributeur.	Echangeur de températures.	Solut. pauvre
	Rectificateur.	Absorbeur.	
	Liquéfacteur.		
	Vanne de régulation.		
	Evaporateur.		

2. — Rendement d'une machine à absorption. — Si on considère le cycle des transformations d'une dissolution ammoniacale dans 1 kilogramme d'eau, nous voyons que celle-ci absorbe de la chaleur à l'extérieur dans le bouilleur et dans l'évaporateur, et dégage de la chaleur à l'extérieur dans le liquéfacteur et dans l'absorbeur.

Si on désigne par Q_b, le nombre de calories absorbées dans le bouilleur ;

Par Q_e, le nombre de calories absorbées dans l'évaporateur ;

Par Q_l, le nombre de calories dégagées dans le liquéfacteur ;

Par Q_a, le nombre de calories dégagées dans l'absorbeur ;

Par $\frac{1}{425}\mathcal{T}_i$, le nombre de calories équivalentes

au travail que nécessite à l'intérieur de la pompe la circulation du liquide riche, le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, donne entre ces diverses quantités la relation

$$Q_b + Q_e + \frac{1}{425}\,\mathfrak{T}_i = Q_l + Q_a.$$

Quant au rendement indiqué d'une telle installation, il est représenté par le rapport

$$\frac{Q_e}{Q_b + \frac{1}{425}\,\mathfrak{T}_i} \text{ ou sensiblement } \frac{Q_e}{Q_b}$$

la quantité de chaleur $\frac{1}{425}\,\mathfrak{T}_i$ étant petite par rapport à Q_b. Le rendement représente alors le nombre de frigories produites par calorie fournie au bouilleur.

Supposons que nous produisions 100.000 frigories-heure en dépensant, d'une part à la chaudière 450 kilogrammes de vapeur saturée à la pression de 3 kilogrammes par centimètre carré (l'eau de condensation sortant du serpentin à la température de 80° C.); et d'autre part à la pompe, 1 cheval-heure indiqué, le rendement indiqué de la machine est

$$\frac{100.000}{450 \times 513{,}15 + 450[132{,}80 - 80] + \frac{270.000}{425}} = \mathbf{0{,}39} \text{ environ.}$$

Il semble actuellement que l'on ne puisse pas dépasser pour ce rendement la valeur 40 p. 100 : les frigories produites dans la machine sont égales au maximum à environ 40 p. 100 du nombre de calories fournies au bouilleur.

3. — Constantes d'une machine à absorption. Type à ammoniaque. — Dans la pratique, on compte qu'en service normal le liquide riche doit contenir 600 grammes d'ammoniaque et le liquide pauvre 200 grammes par kilogramme d'eau, soit une dissolution de 400 grammes d'ammoniaque par kilogramme d'eau. Si l'on veut produire 100.000 frigories-heure avec une température de — 10° C. dans l'évaporateur, il faudra vaporiser par heure

$$\frac{100.000}{313} \text{ kilogrammes d'ammoniaque.}$$

Ce fluide vaporisé devra enrichir par heure un nombre de fois 1.200 grammes d'une solution pauvre égal à

$$\frac{100.000}{313 \times 0,4} = \mathbf{800} \text{ environ.}$$

Si on ramène la solution pauvre 3 fois par heure à l'absorbeur, il faudra employer $\frac{800}{3} = 270$ litres de dissolution.

On compte que, pour une telle machine, le bouilleur devra être construit de manière à contenir 300 litres de dissolution. Le serpentin, qui amène de l'extérieur la vapeur de chauffe du bouilleur, aura une surface égale à 10 ou 12 mètres carrés environ [vapeur saturée à la pression de 3 kilogrammes, température = 133° ; eau de condensation à une température égale à 80°]. L'échangeur de température aura entre la solution riche et la solution pauvre une surface d'échange égale à 20 ou 25 mètres carrés. L'absorbeur présentera entre l'eau de réfrigération d'une

part, la solution et le gaz d'autre part, une surface d'échange de chaleur égale à 30 mètres carrés, avec de l'eau de réfrigération entrant à + 10° C. et sortant à + 20° C. En employant cette eau au liquéfacteur, il faut donner à celui-ci une surface extérieure égale à environ 110 ou 120 mètres carrés. Dans ces conditions, si on emploie un liquéfacteur à immersion, il faut faire circuler par heure autour de l'absorbeur et du liquéfacteur, 350 hectolitres d'eau, soit près de 2 fois et demi la quantité d'eau nécessaire au fonctionnement dans les mêmes conditions d'une machine frigorifique à compression. Cette dépense d'eau est naturellement moindre avec un liquéfacteur à ruissellement.

4. — La machine à absorption comme complément de la machine à compression. — La vapeur qui est consommée pour échauffer le bouilleur, peut être la vapeur d'échappement d'une machine à vapeur. Une machine à absorption peut être adoptée, lorsqu'il s'agit de l'agrandissement d'une installation frigorifique fonctionnant déjà avec une machine à compression actionnée par une machine à vapeur. Celle-ci envoie alors directement sa vapeur d'échappement dans une machine à absorption. Au sortir de celle-ci, l'eau de condensation à 70 ou 80° peut faire retour au générateur de vapeur.

Des machines à absorption peuvent ainsi fonctionner économiquement en utilisant la vapeur d'échappement des centrales électriques d'éclairage surtout durant l'été. Une telle application a

été faite à Nebreska (Etats-Unis) ; la vapeur d'échappement sert non seulement à échauffer le bouilleur d'une machine à absorption, mais encore à produire l'eau distillée nécessaire pour la production de glace.

5. — **Inconvénients de la machine à absorption fonctionnant à l'ammoniaque.** — La nécessité de séparer aussi complètement que possible l'eau du gaz ammoniac donne à la machine à absorption un grand encombrement. De plus, la tension de vapeur de l'ammoniac anhydre liquide est élevée ($7^{atm},6$ à 15° C.) ; d'où une étanchéité difficile à réaliser. Enfin, l'ammoniaque attaquant le cuivre et ses alliages, l'appareil doit être entièrement en fer.

6. — **Machine à absorption fonctionnant à l'anhydride sulfureux.** — Aussi a-t-on cherché depuis longtemps un autre fluide frigorigène et un absorbant correspondant. Le docteur Répin, de l'Institut Pasteur, a expérimenté avec succès l'anhydride sulfureux et un mélange formé de 75 p. 100 de camphre et de 25 p. 100 de naphtol. Le naphtol est employé ici pour faire passer le camphre à l'état liquide et permettre ainsi au gaz sulfureux de barboter dans le mélange et d'entrer en contact intime avec le camphre. Celui-ci dissout, à la température ordinaire, environ 30 p. 100 de son poids de gaz sulfureux ; il suffit de chauffer la dissolution aux environs de 500°, pour que l'anhydride sulfureux se dégage ; l'entraînement du camphre et du naphtol sont très faibles dans ces conditions.

Un cryostat, fondé sur ce principe, fonctionne actuellement à l'Institut Pasteur de Paris. Il se compose d'une bouteille d'acide sulfureux liquide, d'un récipient isolé jouant le rôle d'évaporateur, enfin d'une chaudière en fer timbrée à 12 atmosphères et contenant le mélange de camphre et de naphtol. Si on ouvre la communication entre la bouteille d'anhydride sulfureux et l'évaporateur, celui-ci se remplit de fluide frigorigène. Ce dernier se vaporise à son tour, il est absorbé par le mélange contenu dans la chaudière. Enfin, en chauffant celle-ci et la mettant en relation avec la bouteille, l'anhydride sulfureux se dégage et se liquéfie dans la bouteille sous sa propre pression.

On peut construire sur ce principe de petites machines à glace domestiques. Avec un absorbeur contenant 32 kilogrammes de camphre et 10 kilogrammes de naphtol, capable d'absorber à la température ordinaire 9 kilogrammes d'anhydride sulfureux, on peut avoir une machine capable de produire 5 kilogrammes de glace en une ou plusieurs fois. Au lieu d'employer le camphre, substance d'un prix élevé, M. A. Guiselin a proposé d'employer les huiles minérales lourdes, que l'on rencontre dans les goudrons de distillation de la houille et même dans certains pétroles naturels.



CHAPITRE III

LA MACHINE FRIGORIFIQUE A VAPEUR D'EAU

§ 1. — La machine à éjecteur.

1. — L'eau, fluide frigorigène. — L'eau réunit la plupart des qualités que l'on peut exiger d'un fluide frigorigène. Son prix est faible ; sa chaleur de vaporisation est élevée ; ses vapeurs ne sont pas nocives. Malheureusement le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur saturée est, à une même température, plus grand que celui des fluides frigorigènes étudiés jusqu'ici. Dès lors, pour donner naissance à un même nombre de frigories, il est nécessaire de produire un volume de vapeur saturée beaucoup plus considérable qu'avec un fluide frigorigène, comme l'ammoniaque ou l'anhydride sulfureux. Si ce volume de vapeur saturée doit être aspiré mécaniquement, il faut donner à la machine un volume énorme ou la faire tourner à un nombre de tours par minute très considérable.

2. — Impossibilité de l'emploi de compresseurs à mouvement alternatif. — Prenons, par exemple, un

compresseur du type de ceux que nous avons étudiés, et comparons les volumes qu'il faudrait lui donner, si on le faisait fonctionner dans les mêmes conditions avec de l'eau ou avec de l'anhydride sulfureux. Supposons que la température dans l'évaporateur soit égale à 0°. La chaleur de vaporisation de l'eau est égale à 595 calories-kilogramme ; le volume de 1 kilogramme de vapeur saturée est égal à 205 mètres cubes. Le nombre de frigories produites par mètre cube du volume balayé par le piston est donc égal à

$$\frac{595}{205} = \mathbf{2{,}9} \text{ environ.}$$

Pour produire 1.000 frigories-heure, il faut que le piston balaie par heure dans le compresseur un volume au moins égal à

$$\frac{1.000}{2{,}9} = \mathbf{345} \text{ mètres cubes environ.}$$

Si nous faisons les mêmes calculs avec l'anhydride sulfureux, nous voyons que le nombre de frigories produites par mètre cube du volume balayé par le piston est

$$\frac{90{,}82}{0{,}223} = \mathbf{407} \text{ environ.}$$

et que le volume balayé par heure pour une production de 1.000 frigories-heure devra être au moins égal à

$$\frac{1.000}{407} = \mathbf{2^{m^3}45} \text{ environ.}$$

Le premier volume est 141 fois plus grand que le second.

Un compresseur de 10.000 frigories-heure tournant à 100 tours par minute devrait avoir, en fonctionnant à l'anhydride sulfureux, un volume au moins égal à 4 litres environ; et un volume minimum de 564 litres en fonctionnant avec de la vapeur d'eau. Un compresseur à eau dont le volume serait égal à 4 litres devrait tourner à une vitesse de 14.100 tours par minute.

Ces chiffres nous montrent qu'il est impossible d'utiliser l'eau comme fluide frigorigène dans des compresseurs à mouvement alternatif, du type de ceux qui ont été décrits.

3. — Emploi de la machine à éjecteur. — Mais on peut entraîner cette grande quantité de vapeur d'eau au moyen d'un organe simple et de faibles dimensions en utilisant un jet de vapeur sortant à une vitesse de 1.100 ou 1.200 mètres par seconde au travers de l'extrémité de la tuyère débouchant dans un diffuseur de forme convenable, comme nous l'avons indiqué dans l'Introduction, en exposant le principe de la machine frigorifique à éjecteur.

Toutefois, pour obtenir dans l'évaporateur une température suffisamment basse de la saumure, c'est-à-dire une tension suffisamment faible de la vapeur émise par la dissolution, il faut réaliser au condenseur une pression très basse. On y parvient en employant un *éjecto-condenseur*, c'est-à-dire un condenseur, dont la pompe à vide est constituée par un *éjecteur à liquide*. Ce dernier appareil est identique à l'éjecteur à vapeur décrit dans l'Introduction; la tuyère, au lieu d'être par-

courue par un jet de vapeur, est alimentée par un jet d'eau, qu'une sorte de turbine y lance avec une grande vitesse.

4. — Schéma d'une machine frigorifique Leblanc-Westinghouse. — La figure 52 donne le schéma d'une machine frigorifique Leblanc avec condenseur à mélange et à contre-courant[1].

La saumure réchauffée, venant des chambres de réfrigération représentées ici par le récipient 1, se rend dans un bac de dilution 2, où un robinet à flotteur amène de l'eau douce quand le niveau dans le bac s'abaisse au-dessous d'un certain point.

La saumure convenablement diluée est aspirée par le tuyau 3 à la partie supérieure de l'évaporateur E_v en raison du vide existant dans celui-ci.

Cet évaporateur est formé d'un corps cylindrique B, portant à sa partie supérieure une plaque finement perforée (dans certains types 6.000 trous de 2 millimètres de diamètre) par laquelle la saumure réchauffée tombe en filets minces. Sous l'influence du vide qui règne dans l'évaporateur, cette saumure dégage en tombant de la vapeur d'eau : celle-ci s'échappe par la chemise annulaire A entourant le corps cylindrique B et monte par la tubulure C.

D'un autre côté, la saumure, refroidie par l'évaporation de l'eau, tombe à la partie inférieure 4 de l'évaporateur E_v. Une pompe centrifuge 5,

1. Technique moderne, 3e année, t. III, no 4, avril 1911, p. 241.

l'envoie dans la tuyauterie des chambres, ou au réfrigérant 1.

L'air et la vapeur d'eau à très faible pression enlevés à la saumure pénètrent en II à la péri-

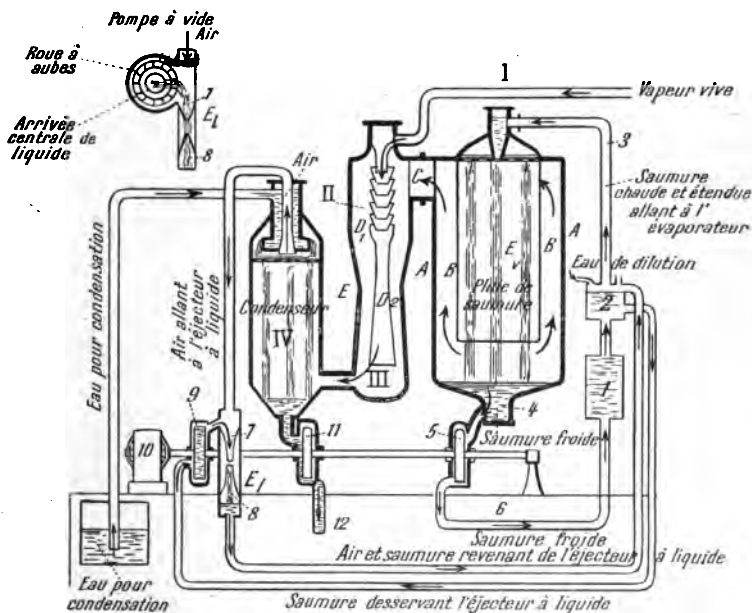


Fig. 52 — Schéma du fonctionnement de la machine frigorifique (eau) à éjecteur de Maurice Leblanc. (Voir dans le texte la signification des lettres et des chiffres inscrits sur la figure. D'après la Technique moderne, 3e année, t. III, avril 1911.)

phérie de l'éjecteur à vapeur E. La vapeur d'eau arrive par la conduite I, pénètre à l'intérieur des tuyères D_1 et dans le diffuseur D_2. Elle entraîne par friction l'air et la vapeur d'eau provenant de la saumure de l'évaporateur. Le mélange sort à

la partie inférieure III de l'éjecteur à vapeur et pénètre à la partie inférieure du condenseur IV, où il est aspiré vers le haut par le vide qui s'exerce en IV. Il rencontre en montant des filets minces d'eau froide provenant d'un réservoir d'eau de condensation et se déversant au travers d'une plaque finement perforée. Au contact de cette eau, la vapeur d'eau du mélange se condense et retombe avec l'eau de chute au fond du condenseur IV ; là ces deux eaux rassemblées sont évacuées en 12 par une pompe centrifuge 11.

L'air qui, dans le mélange gazeux ascendant, était mélangé à la vapeur d'eau venant de la saumure, est aspiré par une tubulure centrale dans le tuyau 7. L'aspiration est produite à la partie supérieure du condenseur, par l'éjecteur à eau E_1, renfermant un cône convergent 7 dans lequel est injecté un liquide, de l'eau ou de la saumure à très grande vitesse ; ce liquide est envoyé par la turbine 9. Le liquide injecté en 7 entraîne avec lui l'air aspiré hors du condenseur ; il tombe dans le cône divergent 8.

Dans les appareils à éjecto-condenseurs, la base III de l'éjecteur à vapeur E communiquait directement avec le sommet de l'éjecteur à liquide E_1. L'éjecto-condenseur était alimenté par de l'eau aspirée dans un puits. Mais il fallait l'amorcer avec de l'eau sous pression.

Ce type d'appareil ne se construit plus. Il est remplacé par le type, dit à condenseur séparé, que nous venons de décrire. Ici on se sert pour alimenter la turbine de l'éjecteur à liquide E_1, de la saumure elle-même venant du bac de dilu-

tion 2, et y faisant retour. Il suffit pour cela de placer ce bac de dilution à un niveau un peu surélevé. On n'a plus à se préoccuper de l'amorçage de l'éjecteur à liquide, qui entre en fonctionnement dès qu'on ouvre le robinet du tuyau d'arrivée de la saumure venant du bac 2. On n'a plus besoin d'eau spéciale pour la marche de cet éjecteur.

L'éjecteur à liquide E_l donne un vide égal à la tension de la vapeur d'eau à la température du liquide de condensation (vide théorique), par exemple, 15 à 20 millimètres de mercure. Les éjecteurs à vapeur font dans l'évaporateur E_v un vide plus grand, en rapport avec la température à laquelle la saumure doit être refroidie, par exemple 3 millimètres de mercure quand on veut atteindre — 5° C. et 6 millimètres de mercure quand il suffit d'obtenir + 5° C.

Les trois pompes de circulation de saumure 5, d'évacuation du condenseur 11, et la pompe 9 de l'éjecteur à eau sont de forme centrifuge; elles sont commandées par un petit moteur unique 10.

Cette machine présente l'avantage de ne comporter ni soupapes, ni clapets sujets à usure rapide : elle est aussi très silencieuse.

Elle consomme dans ses condenseurs un peu plus d'eau que les machines à compression n'en emploient pour leur refroidissement. Lorsque la température n'est pas très basse, la dépense de force motrice employée à la commande de ses pompes, la dépense de vapeur nécessaire à ses éjecteurs, constituent une dépense totale d'énergie

mécanique plutôt inférieure à l'énergie nécessaire à la marche d'une machine à compression. De plus, cette énergie est produite économiquement lorsque la vapeur des éjecteurs peut être empruntée à l'échappement de moteurs à vapeur, comme cela a lieu dans les grandes usines.

5. — **Rendement d'une machine à éjecteur.** — Le *rendement* d'une machine à éjecteur est le rapport du nombre de frigories produites dans l'évaporateur au nombre de calories absorbées par l'eau de réfrigération au condenseur. L'industriel, qui paie cette eau, a intérêt à ce que la production des frigories soit la plus grande possible pour une même dépense d'eau de circulation au condenseur.

Si on considère les températures correspondant aux tensions de la vapeur d'eau dans l'évaporateur et le condenseur, le rendement diminue rapidement lorsque la différence de ces températures augmente. Il est à peu près de 30 p. 100 pour une différence de température égale à 15 ou 20°, soit une température de 5° à 0° dans l'évaporateur pour une température égale à + 20° dans le condenseur.

C'est pourquoi la machine à éjecteur convient bien pour les industries chimiques, dans lesquelles la réfrigération n'a pas besoin d'être poussée au-dessous de zéro.

6. — **Application à la fabrication du benzol.** — La machine à éjecteur a été appliquée pour la première fois en France à la préparation du benzol. On sait que ce corps est extrait des gaz provenant

de la distillation de la houille dans les fours à coke. Les gaz sortant de ces fours sont d'abord traités pour la récupération de l'ammoniaque. Ils sont ensuite mis en contact dans des tours avec de l'huile de goudron qui dissout le benzol. Ce produit étant très volatil, il est difficile de le retenir complètement ; aussi, pour rendre l'opération efficace, est-on forcé de maintenir le dissolvant à une température d'environ 15° C. Cette huile, chargée de benzol, est alors chauffée, ce qui fait dégager le benzol. L'huile chaude est refroidie d'abord à 50° C. au moyen d'échangeurs de température, autour desquels circule l'huile chargée de benzol; puis à 15° C. dans des serpentins autour desquels circule une saumure à + 5° venant de la machine frigorifique.

L'installation faite par la maison Westinghouse aux mines de Béthune comprend deux machines associées d'une puissance frigorifique totale de 60.000 frigories. La plus grande de 56.000 frigories produit la saumure à + 5° ; la plus petite de 4.000 frigories alimente un bac à glace avec une saumure à — 2° ou — 3°. La vapeur fournie à l'éjecteur est de la vapeur d'échappement d'une machine à vapeur ; la dépense est à l'heure d'environ 300 kilogrammes de vapeur à la pression de l'atmosphère, soit une consommation de 186.600 calories, ou un rendement au plus égal à

$$\frac{56.000}{186.000} = \mathbf{0,3} \text{ ou } \mathbf{30} \text{ p. 100.}$$

La machine à glace consomme à l'heure 30 kilogrammes de vapeur à la pression de 1 atmos-

phère, soit 18.660 calories ; elle produit à l'heure 40 kilogrammes de glace, c'est-à-dire 4.800 frigories, soit un rendement au plus égal à

$$\frac{4.800}{18.660} = \mathbf{0,25} \text{ ou } \mathbf{25} \text{ p. } 100.$$

Les pompes sont d'ailleurs commandées par un moteur électrique de 15 chevaux.

7. — Application dans une usine de colles et gélatines. — Une autre machine à éjecteur a été installée à l'usine de Nanterre de la Société des Colles et Gélatines françaises pour refroidir de l'air destiné à activer la prise de la gélatine. La machine installée, d'une puissance de 10.000 frigories-heure, a ses pompes mues par un petit moteur à vapeur à grande vitesse Boulte-Larbodière de 5 chevaux, dont l'échappement se fait dans l'éjecteur à vapeur. Dans cette petite installation, la saumure n'ayant pas besoin d'être amenée à une basse température, l'évaporation de son eau n'exige pas un vide élevé ; un éjecteur à vapeur suffit pour produire à lui seul le vide nécessaire dans le condenseur à mélange ; l'éjecteur à liquide et sa turbine sont supprimés.

8. — Application sur les navires de guerre au refroidissement des soutes à munitions. — Mais c'est surtout sur les navires que les machines à éjecteur peuvent rendre de grands services. Elles emploient un fluide frigorigène, qui ne présente aucun danger d'incendie et qui peut être renouvelé avec de l'eau de mer. Aussi des machines à éjecteur,

servant à rafraîchir, à une température de quelques degrés au-dessus de zéro, de l'air circulant dans les soutes, ont-elles été installées sur un grand nombre de cuirassés français. Le *Suffren*, le *Danton*, le *Mirabeau*, le *Diderot*, le *Condorcet*, le *Vergniaud* possèdent chacun deux éjecteurs de respectivement 20.000 et 10.000 frigories-heure ; le *Courbet* et le *Jean-Bart* ont trois éjecteurs, deux de 20.000 frigories-heure, un de 10.000 frigories-heure. Ces éjecteurs multiples sont desservis par un condenseur unique, du type à surface, ce qui exige, outre les trois pompes dont nous avons parlé plus haut, une quatrième pompe pour la circulation de l'eau de condensation. Les quatre pompes sont, pour réduire l'encombrement, commandées par deux arbres parallèles actionnés par des moteurs électriques de 8 chevaux.

9. — Résultats d'essais d'une machine à éjecteur. — Afin de donner une idée du fonctionnement de ces éjecteurs, voici les résultats d'essais avec deux éjecteurs (20.000 et 10.000 frigories-heure).

Pressions en millimètres de mercure. .	Dans l'évaporateur .	**11,5**
	Dans le condenseur.	**63,2**
Températures correspondantes. . .	Dans l'évaporateur .	**13°,25**
	Dans le condenseur.	**42°,3**
Différences de températures créées par les injecteurs.	42,30 — 13,25 =	**29°,05**
Pression de la vapeur vive.		**8** kg. cm².
Températures. Eau de circulation.	à l'entrée du condenseur.	**29°,5**
	à la sortie du condenseur.	**34°**
Températures. Saumure.	à l'entrée de l'évaporateur.	**16°,4**
	à la sortie de l'évaporateur.	**14°,25**
Echauffement de l'eau de circulation au condenseur.		**4°,5**

Refroidissement de la saumure.		**2°.14**
Débits.	En litres-seconde, eau de circulation .	**11,9**
	En litres-heure, vapeurs condensées .	**218**
	En litres-seconde, pompe à saumure .	**5,6**
Refoulements en mètres, de la pompe à saumure.		**20**
Puissance totale en chevaux dépensée pour la manœuvre des pompes		**10**
Frigories-heures produites pour une différence de température égale à 29°, entre l'évaporateur et le condenseur		**42.000**
Dépense totale de vapeur à 8 kilogrammes-centimètres carré, en comprenant la dépense de vapeur nécessaire au fonctionnement des pompes.		**250** kilogr.
Frigories produites par kilogramme de vapeur motrice dépensée . . . . $\frac{42.000}{250}$ =		**168**
Calories dégagées par heure au condenseur $3.600 \times 11,9 \times 4,5$. . . . . =		**193.000**
Rendement : frigories produites par calorie dégagée au condenseur $\frac{42.000}{193.000}$ =		**0,22** ou **22** p. 100

§ 2. — Le compresseur rotatif.

1. — Défauts de la machine à éjecteur. — La machine à éjecteur présente un certain nombre de défauts, parmi lesquels on peut citer les suivants.

1° Toutes choses égales d'ailleurs, la production de frigories par kilogramme de vapeur motrice va en diminuant rapidement lorsque la différence des températures dans le condenseur et dans l'évaporateur va en augmentant.

Cette production de frigories varie entre 150 et 200 lorsque cette différence de température est comprise entre 25 et 30 degrés ; elle baisse à 60,

lorsque la différence des températures précédentes atteint 45 ou 50 degrés.

Or, si l'on a des eaux de refroidissement un peu chaudes pour le condenseur, et si l'on veut descendre à — 10° C. dans l'évaporateur, on arrive facilement à des différences de températures voisines de 35 à 40 degrés ; et, par suite, à une production excessivement faible de frigories par kilogramme de vapeur.

On a songé à fractionner la différence des températures entre le condenseur et l'évaporateur, et à installer plusieurs éjecteurs, dont chacun aurait pour office de produire une fraction de la différence des températures. Ces éjecteurs seraient montés en série, chacun d'eux devant aspirer et refouler la vapeur aspirée par tous ceux qui le précèdent. Mais chacun de ces éjecteurs devrait aussi aspirer et refouler toute la vapeur motrice consommée par les éjecteurs qui le précèdent. Il en résulterait que la dépense de vapeur d'un éjecteur croîtrait en progression géométrique, lorsque son rang croîtrait en progression arithmétique ; si, toutes choses égales d'ailleurs, le second éjecteur dépensait deux fois plus de vapeur que le premier, le troisième éjecteur en dépenserait quatre fois plus que le premier, et ainsi de suite. Dans de telles conditions, le nombre de frigories produites par kilogramme de vapeur irait en diminuant.

2° Le plus grave défaut de l'éjecteur est le suivant :

La vapeur aspirée dans l'évaporateur se trouve intimement mélangée à la vapeur motrice, qui

traverse les tuyères. Il faut condenser simultanément ces deux vapeurs. Il en résulte une grande dépense d'eau de refroidissement ; si on dépense 3 kilogrammes de vapeur motrice par kilogramme de vapeur aspirée, et si on veut maintenir dans le condenseur la même température que si l'on n'y condensait que de la vapeur aspirée, il faut dépenser au moins quatre fois plus d'eau de condensation. Une telle consommation est sans importance à bord des navires, où l'eau de condensation est en quantité indéfinie et où l'on ne doit pas dépenser de travail pour l'élever. Il n'en est pas de même à terre où cela interdit le plus souvent l'emploi des eaux de couche pour la condensation, parce qu'elles sont peu abondantes et qu'il faut généralement les élever à une assez grande hauteur.

Enfin, si l'on veut développer la distribution du froid à domicile dans les villes pour la réfrigération des habitations durant l'été, il convient de ménager l'eau de condensation.

C'est pourquoi M. Leblanc s'est proposé de construire une pompe mue mécaniquement et capable, sous un petit volume, d'aspirer les énormes volumes de vapeur d'eau, que nécessite l'emploi de ce corps comme liquide frigorigène. Il s'est adressé pour cela aux *compresseurs rotatifs*.

2. — **Principe des compresseurs rotatifs**. — Le principe de ce compresseur est le suivant. Imaginons un tambour fixe cylindrique à axe horizontal ; ce tambour est fermé et plein d'un certain fluide. Imprimons à ce fluide un mouvement de rotation

autour de l'axe du tambour. Ce mouvement développe en chaque point de la masse du fluide une force proportionnelle à la masse, au carré de la vitesse angulaire de rotation et à la distance du point considéré à l'axe de rotation ; c'est la force centrifuge. Par suite du développement de celle-ci, la pression exercée sur un élément de surface va en augmentant quand on s'éloigne de l'axe de rotation vers la circonférence du tambour.

Dès lors, si un tuyau T_1 est implanté dans la surface extérieure du tambour, tandis que la partie voisine de l'axe de rotation est en relation avec un tuyau d'aspiration T_2, il y aura par suite du mouvement de rotation du fluide, *aspiration par le tuyau* T_2 *et refoulement du fluide aspiré par le tuyau* T_1.

Le mouvement de rotation du fluide contenu dans le tambour est engendré au moyen d'une roue à palettes ou à aubes noyée dans le fluide. De l'extérieur du tambour on commande le mouvement de rotation de cette roue.

La différence qui existe entre les pressions du fluide au voisinage de l'axe de rotation (entrée de la roue) et à la sortie de la roue est la *pression engendrée par la roue*. Cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse périphérique des ailes de la roue et à la densité moyenne du fluide dans la roue (moyenne des densités de ce fluide à l'entrée et à la sortie de la roue).

Si la pression à engendrer est grande, ou si la vitesse périphérique des ailes ne peut pas dépasser une certaine limite, on fractionne la pression totale en une série de pressions partielles

que l'on fait engendrer par des roues montées sur un même arbre. Chacune de ces roues tourne dans un tambour fermé ; le même fluide passe successivement dans chacun de ces tambours, entrant chaque fois au voisinage de l'axe de rotation et sortant à la périphérie du tambour. L'ensemble de ces roues *montées en série* constitue ce que l'on appelle un *compresseur rotatif multicellulaire*, ou un *compresseur rotatif à roues multiples ou à phases multiples* (fig. 53).

De tels compresseurs ont été étudiés par M. Rateau pour les machines soufflantes des Hauts-Fourneaux. La machine soufflante de Vizcaya est formée de quatre roues en série ayant un rayon égal à 800 millimètres ; en tournant à la vitesse de 1.700 tours par minute (vitesse périphérique des ailes $= \frac{2\pi \times 1.700}{60} \times 0,80 = 143$ mètres par seconde) cette machine aspire par seconde 18 mètres cubes d'air à la pression atmosphérique et les refoule à une pression de $1,56 \frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2}$; elle absorbe 1.800 chevaux dans ce mode de fonctionnement.

3. — Compresseur rotatif utilisable en industrie frigorifique. — Dans la question actuelle, il s'agit de construire un compresseur rotatif de petites dimensions, n'absorbant qu'un faible nombre de chevaux et capable cependant d'aspirer par seconde plusieurs mètres cubes d'un fluide de densité beaucoup plus petite que l'air. Si on veut maintenir dans l'évaporateur une température égale à — 20° C. et dans le condenseur la tempéra-

ture de + 20° C., il faut, par kilogramme de vapeur aspirer un volume égal à 1.172 mètres cubes (densité de la vapeur 1.444 fois plus petite que celle de l'air) et produire un accroissement de

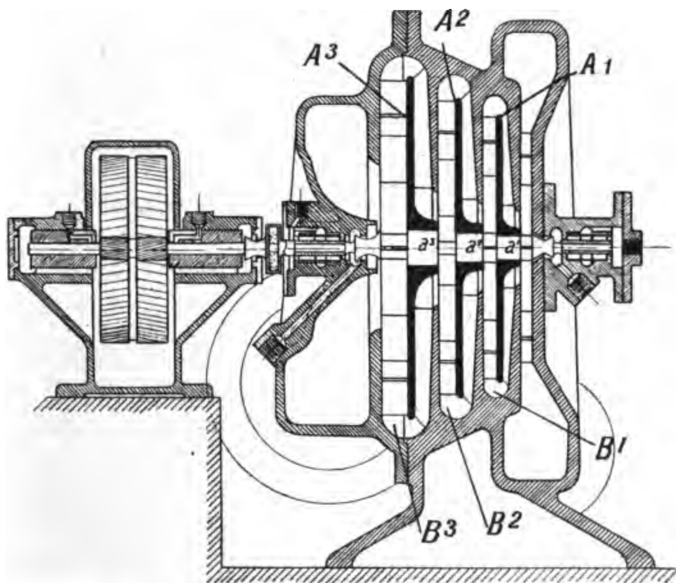


Fig. 53. — Compresseur rotatif multicellulaire Maurice Leblanc.

A_1, A_2, A_3, ailes ; B_1, B_2, B_3, tambours dans lesquels tournent les ailes A_1, A_2, A_3 ; a_1, a_2, a_3, entrées de l'eau dans chacun des tambours B_1, B_2, B_3.

pression égal à $16^{mm},6$ de mercure [depuis $0^{mm},8$, tension de vapeur saturée de la glace à — 20° ; jusqu'à $17^{mm},4$, tension de la vapeur saturée de l'eau à + 20°]. Or, plus la densité du fluide aspiré doit être faible, plus grande doit être la vitesse périphérique des ailes ; plus la puissance

du compresseur doit être réduite, plus sa vitesse angulaire doit être augmentée.

M. Leblanc étudie à l'heure actuelle, pour résoudre ce problème, un compresseur rotatif formé de quatre roues en série de diamètres décroissants, dont la plus grande présentera un diamètre égal à 320 millimètres. La vitesse périphérique de la grande roue devant être égale à 500 mètres par seconde, le compresseur devra tourner à raison de 30.000 tours par minute (500 tours par seconde, fig. 53).

Mais une masse du poids de 1 gramme ($0^{kg},001$) est, à l'extrémité d'une telle roue (de rayon égal à $0^{m},16$), soumise à une force centrifuge égale à

$$\frac{1}{9,81 \times 1.000} \times 4\pi^2 (500)^2 \times 0,16 = \mathbf{160} \text{ kilogrammes.}$$

Il fallait faire des ailes susceptibles de supporter de telles forces sans être rompues ou arrachées.

4. — Le compresseur rotatif Leblanc-Westinghouse. La construction des ailes des roues. — M. Leblanc[1] y est parvenu en constituant ces ailes par des fils en ramie tendus parallèlement et agglutinés entre eux par de la cellulose dissoute (solution d'acétate de cellulose dans l'acétone). Il constitue ainsi des bandes, dont la densité est sensiblement celle de l'eau ; enfin, il superpose ces bandes en les collant avec la solution précédente. Les ailes, qui sont ainsi de simples lames dirigées suivant des

1. Maurice Leblanc. Sur les machines frigorifiques à vapeur d'eau. *Revue générale du froid*, 4e année, t. IV. n° 11, novembre 1912.

rayons, ont 3 millimètres d'épaisseur à leur base et $1^{mm},4$ à leur extrémité ; elles sont fixées à queue d'aronde dans des rainures portées par le moyeu qui fait corps avec l'arbre (fig. 54 et 55). Chaque aile tourne avec le moins de jeu possible entre deux plateaux fixes, qui limitent l'alvéole correspondant à chaque roue.

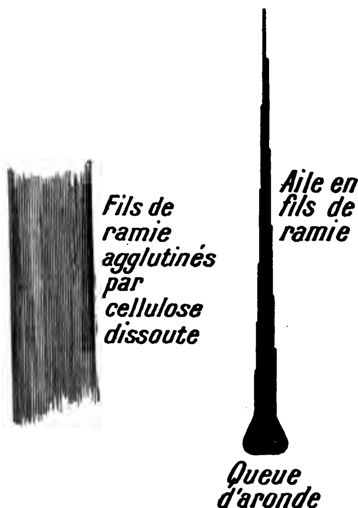


Fig. 54. — Les ailes du compresseur rotatif Maurice Leblanc.

L'acétate de cellulose constitue un vernis très dur, que l'on ne peut rayer avec l'ongle et qui protège bien les fils qu'il recouvre. Cependant il ne raye pas les métaux et s'use en frottant entre eux. De là résulte un avantage précieux. Des ailes en acier constitueraient une véritable fraise, qui altérerait rapidement les surfaces métalliques, entre lesquelles elles tourneraient, si elles venaient à leur contact. Cela obligerait à laisser entre les ailes des roues et les surfaces limites des alvéoles un jeu assez grand. Or, on peut impunément laisser frotter les ailes en fibres végétales contre ces surfaces ; ce sont les ailes qui s'usent.

Il suffit de les faire tourner d'abord à une vitesse modérée pour les ajuster dans leurs alvéoles. On arrive ainsi à avoir des jeux pratiquement nuls.

5. — Le compresseur rotatif Leblanc-Westinghouse. L'équilibrage automatique du rotor. — Lorsqu'un solide tourne avec une très grande vitesse autour d'un axe (cas auquel les forces centrifuges peuvent être considérées comme agissant seules sur lui), ce solide s'oriente de telle façon que cet axe, passant par son centre de gravité, soit son grand axe principal d'inertie. Si le solide présente un axe de figure dans le voisinage immédiat de l'axe principal d'inertie, il y a intérêt à équilibrer les masses tournantes autour de cet axe de figure, de manière qu'il soit en même temps grand axe principal d'inertie. L'axe de figure devient alors axe naturel de rotation.

C'est ce qui doit avoir lieu pour l'ensemble formé par l'arbre et les roues en fibre du compresseur rotatif dont nous venons de parler, ensemble auquel nous donnerons le nom de *rotor*.

Mais un tel équilibrage est très difficile à réaliser durant la construction, si les pièces tournantes sont indéformables. Avec des pièces comme les ailes en fibres végétales, qui peuvent être déformées par l'action de la force centrifuge, il faut avoir recours à des équilibreurs automatiques, fonctionnant durant la marche, et tendant toujours à ramener le grand axe principal d'inertie en coïncidence avec l'axe de figure. Les équilibreurs automatiques de M. Leblanc sont constitués par des tores creux partiellement remplis

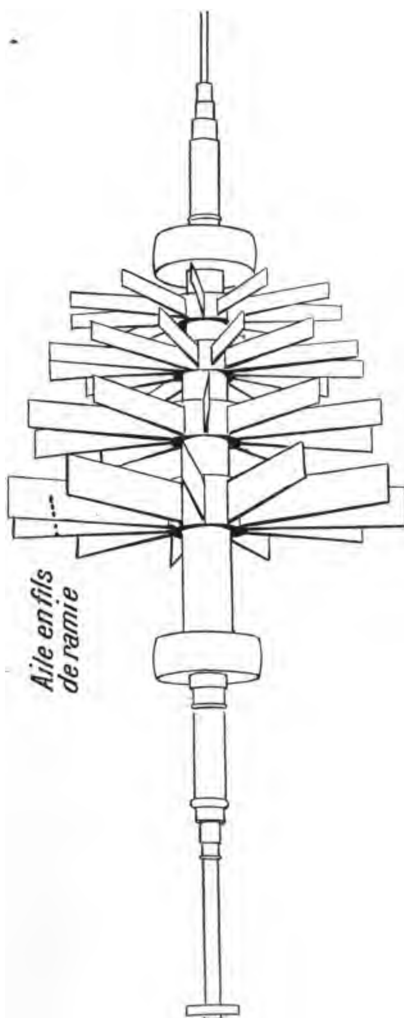


Fig. 55. — L'arbre et les ailes du compresseur rotatif Maurice Leblanc.

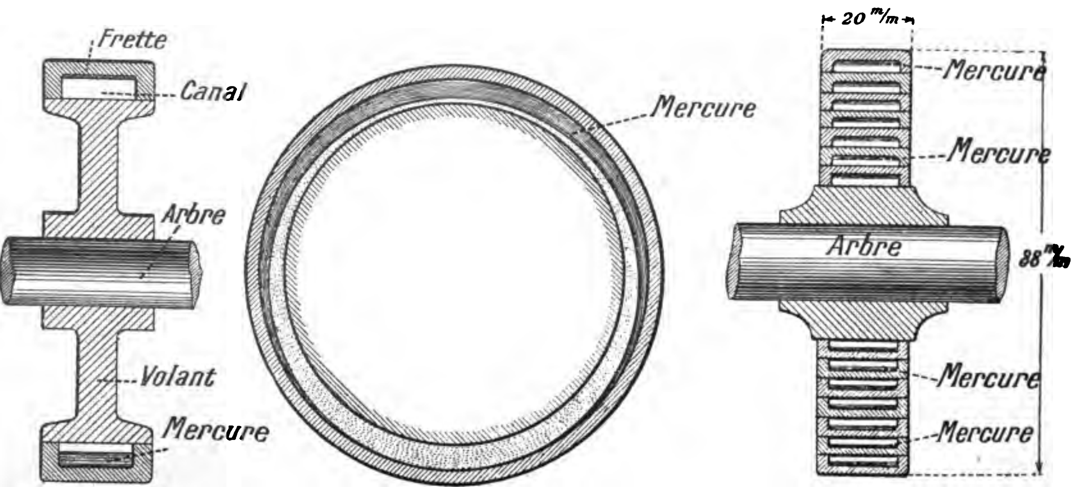


Fig. 56. — Compresseur rotatif Maurice Leblanc. Équilibrage automatique du rotor.

de mercure ; ces tores sont calés sur les jantes de

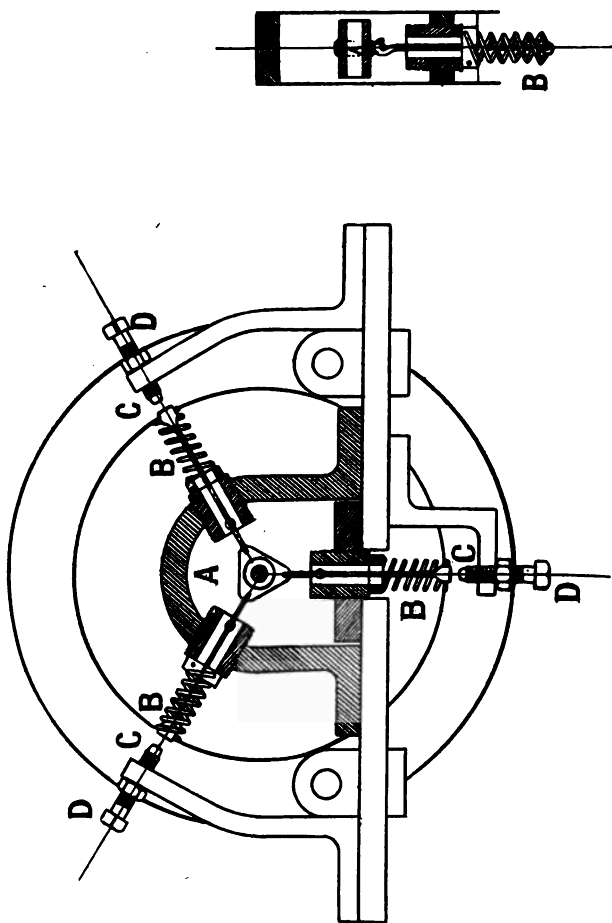


Fig. 57. — Compresseur rotatif de Maurice Leblanc. Suspension élastique du rotor.

A, coussinet très léger relié par trois crochets à des tiges tirées par trois ressorts B situés à 120° les uns des autres ; C, butées limitant les courses des tiges-support de A ; D, vis réglant la position des butées C.

deux petits volants fixés aux deux extrémités de l'arbre du rotor. Les masses de mercure sont des

masses additionnelles, dont le centre de gravité va occuper de lui-même, sous l'influence des forces centrifuges, la place voulue pour assurer l'équilibrage (fig. 56).

Mais, pour que les équilibreurs fonctionnent, il est nécessaire que le rotor soit suspendu sur des coussinets très légers reposant eux-mêmes sur des ressorts très souples et de très faible masse. On laisse ainsi le rotor libre de choisir à chaque instant son axe de rotation et on évite une grande fatigue des matériaux qui le constituent.

Le mouvement est d'ailleurs transmis d'un arbre reposant sur des coussinets fixes, et cela au moyen d'un arbre flexible[1] (fig. 56 et 57).

1. Pour l'étude de ces questions voir les publications suivantes : Maurice Leblanc. Note sur les machines frigorifiques à vapeur d'eau (*La Revue générale du froid*, 4e année, t. IV, n° 11, novembre 1912).— Maurice Leblanc. Etude sur la réalisation des grandes vitesses angulaires (*Bulletin de l'Association technique maritime*, 1912). — Maurice Leblanc. Machines rotatives à très grandes vitesses (*Mémoires de la Société des ingénieurs civils*, février 1913).



CHAPITRE IV

LES ISOLANTS THERMIQUES

1. — Coefficient de transmission de la chaleur au travers d'un isolant. — Les parois des chambres froides doivent être tapissées de substances destinées à empêcher la déperdition des frigories; ce sont les *isolants thermiques.*

Définissons d'abord un nombre qui caractérise la valeur de l'isolant, le *coefficient de transmission de la chaleur au travers de cet isolant.*

Considérons une plaque ABCD d'un certain isolant. Soient t_1 et t_2 les températures de l'air baignant les deux faces AB et CD en des couches A'B' et C'D' très voisines de ces faces (fig. 58).

La quantité de chaleur qui, dans un temps τ, traverse un cylindre *mnpq* de section S est proportionnelle :

1° Au temps τ;

2° A la surface S;

3° A la différence $(t_1 - t_2)$, $t_1 > t_2$.

Le coefficient de proportionnalité reçoit le nom de *coefficient de transmission de la chaleur au travers de l'isolant.*

Dans la pratique de l'Industrie Frigorifique,

on exprime souvent la transmission de la chaleur par un nombre représentant les calories-kilogrammes, qui traversent une surface S exprimée en mètres carrés, durant le temps τ en heures, avec une différence $(t_1 - t_2)$ en degrés centigrades.

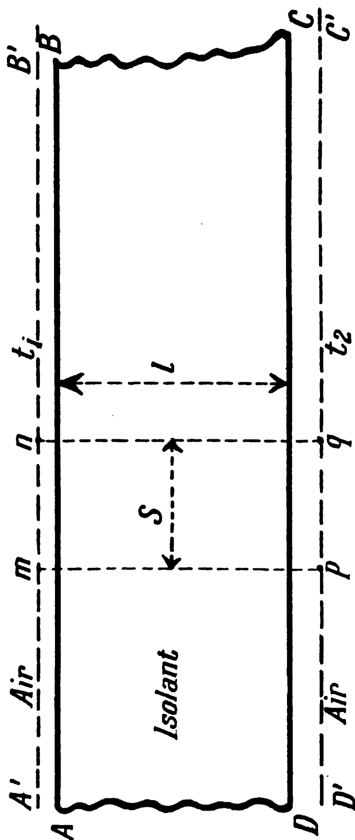


Fig. 58. — Plaque isolante.

Quand on dit, que le coefficient de transmission de la chaleur au travers d'un mur de briques de 15 centimètres d'épaisseur est égal à 2,36 ; cela veut dire que dans une heure, pour une différence de température de 1°C. entre les deux faces du mur, il passe au travers de 1 mètre carré de la paroi

$$2{,}36 \ \frac{\text{cal.-kg.}}{\text{heure} \times m^2 \times 1^\circ\text{C.}}$$

Le coefficient que nous venons de définir dépend de divers facteurs.

2. — Coefficients de transmission superficiels. — *a*) En premier lieu il est fonction du mode suivant lequel la chaleur se transmet de l'air ou des milieux ambiants (couches A′ B′ et C′D′) aux surfaces AB et CD de la paroi isolante considérée. Ce mode de transmission est caractérisé par des nombres, qui sont dits *coefficients de transmission superficiels des deux surfaces de la paroi étudiée au milieu ambiant.*

Ces coefficients, qui dépendent de la nature de la paroi et du milieu ambiant, de l'état de repos ou de mouvement de ce dernier, sont assez mal connus. Dans les calculs d'isolement on admet qu'ils sont compris entre 8,50 et 10 quand le milieu ambiant est l'air en repos.

3. — Coefficient de conductibilité thermique ou coefficient de conductibilité intérieure. — *b*) Le coefficient de transmission de la chaleur dépend en outre du mode de transmission de la chaleur au travers du solide isolant lui-même, en particulier de la nature de ce solide et de son épaisseur. Il diminue lorsque cette épaisseur augmente et varie comme un coefficient caractéristique de la substance qu'on appelle *son coefficient de conductibilité thermique* ou son *coefficient de conductibilité intérieure.*

Ce dernier coefficient représente le nombre de calories-kilogrammes qui, par heure, traverse 1 mètre carré de la paroi isolante, lorsque l'épaisseur de cette paroi est égale à 1 mètre et que la différence des températures entre les deux faces

de la paroi (faces AB et CD de la fig. 58) est égale à 1°.

Le coefficient de conductibilité thermique varie avec la température moyenne du solide isolant. Lorsque cette température augmente de 1°, le coefficient de conductibilité s'accroit de $\frac{1}{273}$ environ.

Pour la pratique de l'industrie frigorifique, il suffit de connaître la valeur du coefficient de conductibilité thermique pour une température moyenne du solide isolant voisine de la température de zéro. Ce sont de tels nombres que l'on trouvera dans la suite.

4. — **Coefficient de transmission de la chaleur et coefficient de conductibilité intérieure.** — Lorsque l'épaisseur de la paroi isolante est suffisante [$0^{m},20$ dans le cas des lièges], le coefficient de transmission est proportionnel au coefficient de conductibilité thermique et inversement proportionnel à l'épaisseur de la paroi isolante.

Justifions cette proposition par un exemple.

Considérons une paroi isolante de liège ayant une épaisseur égale à $0^{m},50$ et confinant par ses deux faces extrêmes à l'air. Le coefficient de conductibilité thermique de ce liège étant 0,05, le coefficient de transmission de la chaleur au travers de la paroi a, comme le montre la théorie, pour valeur

$$\frac{1}{\frac{2}{10} + \frac{0,50}{0,05}} = \frac{1}{10,2}$$

En prenant pour valeur du coefficient de transmission de la chaleur

$$\frac{1}{10} = \frac{0.05}{0.50} = \frac{\text{coefficient de conductibilité}}{\text{épaisseur de l'isolant}}$$

on commet une erreur égale à 2 p. 100, c'est-à-dire négligeable. On peut donc dire que le coefficient de transmission de la chaleur est proportionnel au coefficient de conductibilité et qu'il varie en raison inverse de l'*épaisseur* de l'isolant.

Si l'épaisseur de la paroi isolante est égale à $0^m,10$, le coefficient de transmission de la chaleur a pour valeur

$$\frac{1}{\frac{2}{10} + \frac{0,10}{0,05}} = \frac{1}{2.2}$$

En prenant $\frac{1}{2}$ comme valeur de ce coefficient, on commet une erreur égale à 10 p. 100. La loi de proportionnalité du coefficient de transmission de la chaleur au coefficient de conductibilité ne peut plus être admise.

Enfin, comme une telle erreur est réduite à 5 p. 100 pour une épaisseur de liège égale à 0^m20, on voit bien que la proportionnalité du coefficient de transmission de la chaleur au coefficient de conductibilité n'est vraie, pour les parois isolantes, qu'à partir d'une épaisseur convenable, qui correspond à une épaisseur de liège égale à $0^m,20$.

5. — Valeurs que doit prendre le coefficient de transmission pour répondre aux exigences de la pratique. —

Pour qu'une paroi isolante réponde aux exigences de la pratique, il est bon que son coefficient de transmission ait les valeurs suivantes, qui représentent *la déperdition de frigories par heure, par mètre carré de la surface de la paroi, et pour une différence de température égale à un degré entre ses deux faces.*

	COEFFICIENT de transmission de la chaleur.
Grandes valeurs de la différence des températures entre les deux faces de la paroi [20° environ].	**0,15** à **0,20**
Moyennes valeurs de la différence des températures entre les deux faces de la paroi [10° environ]. .	**0,20** à **0,30**
Faibles valeurs de la différence des températures entre les deux faces de la paroi [5° environ]	**0,30** à **0,45**

6. — Avantages économiques d'un bon isolement. — Montrons l'avantage obtenu en réalisant un isolement convenable.

Prenons une maçonnerie en moellons non isolée ayant $0^m,50$ d'épaisseur. Le coefficient de transmission de la chaleur au travers de cette paroi est égal à 2,21 environ. Disposons sur cette paroi un revêtement isolant, qui réduit le coefficient de transmission à 0,25. Nous évitons ainsi par heure, par mètre carré de la surface isolée et par degré de différence de température entre les deux faces une déperdition de frigories égale à

$$2,21 - 0,25 = \mathbf{1,96}$$

Pour une durée de dix ans (durée de l'installation) à trois cent soixante jours de vingt-quatre

heures, on évitera par l'emploi de l'isolant une déperdition de frigories égale à

$$1,96 \times 10 \times 360 \times 24$$

soit pour une différence de température égale à 20° entre les deux faces de la paroi isolée

$$1,96 \times 20 \times 360 \times 24 \times 10$$

Comptons 150 francs comme prix du mètre cube d'isolant, soit 30 francs par mètre carré pour une épaisseur de cet isolant égale à $0^{m},20$. Ce prix est porté à 35 francs par mètre carré en comptant la pose. Le prix de la conservation de la frigorie est alors

$$\frac{35}{1,96 \times 200 \times 360 \times 24}$$

et le prix de la conservation de 1.000 frigories est

$$\frac{35.000}{1,96 \times 36 \times 24 \times 2.000} = 0^{fr},01.$$

On admet généralement $0^{fr},05$ comme prix de la production de 1.000 frigories [prix de 1.000 frigories = 10 fois le prix de 1.000 calories ; $0^{fr},005$, prix de 1.000 calories avec 1 kilogramme de charbon à 25 francs la tonne produisant 5.000 calories]. Le calcul précédent montre donc qu'il y a un sérieux avantage à isoler convenablement un mur.

7. — Conditions que doivent remplir les isolants employés dans l'Industrie frigorifique. — Les isolants que l'on peut employer dans les installations fri-

gorifiques doivent remplir un certain nombre de conditions que nous allons énumérer.

1° En premier lieu plus est faible le coefficient de conductibilité thermique de l'isolant, moins grande doit être l'épaisseur de cet isolant qu'il faut employer pour réaliser les valeurs convenables du coefficient de transmission de la chaleur. Or, une diminution d'épaisseur procure une économie d'espace et une économie de matière à mettre en œuvre. On exprime encore cette condition en disant que la matière employée doit être *très mauvaise conductrice de la chaleur*. A ce point de vue, les substances dont le coefficient de conductibilé thermique est compris entre 0,03 et 0,05 conviennent pour la pratique ; elles correspondent à une transmission au travers d'une épaisseur de 1 mètre de la substance de $0^{cal},03$ à $0^{cal},05$ par heure, par mètre carré, et par degré de différence de température entre les deux faces extrêmes de l'isolant (faces AB et CD de la fig. 58). Une épaisseur de 20 centimètres de liège dont le coefficient de conductibilité thermique est égal à 0,05 correspond à un coefficient de transmission égal à

$$\frac{0{,}05}{0{,}20} = \mathbf{0{,}25}.$$

Une plaque de ce liège dont l'épaisseur est égale à 10 centimètres et qui confine à l'air par ses deux faces extrêmes a un coefficient de transmission de la chaleur égal à

$$\frac{1}{\frac{2}{10} + \frac{0{,}10}{0{,}05}} = \mathbf{0{,}45}.$$

2° *L'isolant doit avoir un faible poids spécifique (poids par mètre cube).*

Cette condition est importante pour les installations sur les transports (wagons et cales des navires frigorifiques). Elle ne présente pas un intérêt moins grand pour les installations à terre, à cause de la réduction des frais de transport jusqu'à pied d'œuvre et de la possibilité de faire des économies sur les dépenses de construction en édifiant des constructions plus légères.

Les lièges agglomérés au brai, très employés dans l'industrie frigorifique, ont un poids spécifique égal à 275 ou 285 kilogrammes par mètre cube.

3° *L'isolant ne doit pas être hygroscopique.* — Les substances isolantes ne doivent pas absorber et retenir l'humidité. Lorsqu'elles sont humides, elles deviennent bonnes conductrices de la chaleur.

Par exemple un liège, aggloméré avec de la caséine, sec et sous le poids spécifique de 148 kilogrammes par mètre cube, possède un coefficient de conductibilité thermique égal à 0,044 ; humide et sous le poids spécifique de 280 kilogrammes par mètre cube (séjour de vingt jours dans l'eau), son coefficient de conductibilité thermique est doublé et égal à 0,088. Une substance moins hygroscopique, un liège aggloméré au brai, dont le poids spécifique passe de 285 (sec) à 310 kilogrammes par mètre cube (séjour de vingt jours dans l'eau), voit son coefficient de conductibilité thermique passer seulement de 0,052 à 0,076.

4° *Si les matières isolantes ont absorbé de l'humidité* [par suite de la rupture d'une conduite d'eau, par exemple], *elles doivent pouvoir se sécher facilement et retrouver après ce séchage leurs propriétés isolantes.*

5° *Les matières isolantes doivent être exemptes d'odeur ; elles ne doivent pas être putrescibles, même quand elles sont humides.*

La viande, le beurre, les œufs absorbent facilement les odeurs et deviennent impropres à la consommation. Aussi convient-il de rejeter certains isolants peu coûteux, mais susceptibles de fermenter, tels la balle de riz, la paille hachée, la balle d'avoine.

6° *Il est même bon, dans certains cas, d'avoir des isolants capables d'absorber les mauvaises odeurs.*

La tourbe se trouve avoir une telle propriété absorbante. Mais elle demande une préparation spéciale, qui est, paraît-il, réalisée par une fabrique bavaroise.

7° *L'isolant ne doit pas attirer les parasites* (rats, souris, etc.), *ni offrir aux microbes un bon terrain de culture.*

8° *Les matières isolantes doivent être incombustibles ou, du moins, ne doivent pas propager la combustion commencée en un point de leur masse.*

Cette condition est particulièrement importante pour les installations d'isolement à bord des navires. C'est pourquoi la *laine minérale*, sorte de verre filé extrait des scories des hauts-fourneaux, et totalement incombustible, est

assez employée pour cet objet, malgré son inconvénient d'être très hygroscopique.

9° Une fois mises en place dans les bourrages, qui constituent les couches d'isolement, *les substances isolantes ne doivent pas se tasser et produire ainsi dans l'isolement des solutions de continuité.*

Certains revêtements de charbons de bois durs, dénommés *charcoal*, peuvent par tassement, voir leur poids spécifique ou leur densité de bourrage, passer de 200 à 230 kilogrammes par mètre cube ; leur coefficient de conductibilité thermique s'accroît en même temps. Nous n'avons pas de données expérimentales sur cette variation pour le charcoal. Mais des expériences de Nüsselt et de Grœber ont montré que pour l'amiante le coefficient de conductibilité thermique devient deux fois plus grand (de 0,1 à 0,2 à la température de 0°) quand le poids spécifique est lui-même presque doublé (de 380 à 700 kilogrammes par mètre cube].

Au Conservatoire des Arts-et-Métiers, M. Biquard a trouvé les valeurs suivantes du coefficient de conductibilité thermique de l'amiante.

Amiante blanche en fibres (57 kilogrammes par mètre cube)	0,054
Amiante ondulée (carton). Ondulium (260 kilogrammes par mètre cube) . . .	0,072
Amiante comprimée (1240 kilogrammes) par mètre cube)	0,220

Le kapok de Java sous le poids spécifique de 15,7 kgr. par mètre cube a donné le plus faible coefficient de conductibilité 0,034.

10° Les matières isolantes ne doivent pas attaquer les parties en bois, en fer, ou en maçonnerie en contact avec elles.

11° Elles doivent présenter des facilités pour le façonnage et l'application contre les parois des chambres.

12° Elles doivent offrir une certaine résistance à la flexion et à l'écrasement.

13° Enfin, les matières isolantes ne doivent pas perdre leurs qualités avec le temps.

8. — **Emploi de l'air comme isolant**. — Etudions maintenant quelques-uns des isolants employés dans l'industrie frigorifique.

L'air est un *excellent isolant* à la condition d'être *sec* et *en repos aussi parfait que possible.* L'air parcouru par des courants a un coefficient de conductibilité thermique près de trois fois supérieur à celui du premier milieu [0,04 en moyenne pour ce dernier; 0,115 pour l'air en mouvement]. L'air humide est aussi, toutes choses égales d'ailleurs, bien plus conducteur que l'air sec. Divers expérimentateurs ont constaté que le coefficient de conductibilité thermique de l'air sec augmente avec l'épaisseur de la lame d'air soumise aux essais ; ce coefficient serait, toutes choses égales d'ailleurs, égal à 0,02 pour les très petites épaisseurs ; à 0,04 pour les épaisseurs voisines de 20 millimètres ; à 0,07 pour les épaisseurs de 40 à 140 millimètres [1].

1. Cet accroissement semble dû à l'existence de courants se produisant plus facilement dans les couches un peu épaisses que dans les lames très minces.

Il résulte immédiatement de là que, dans la pratique, on n'a pas intérêt à donner aux lames d'air une épaisseur supérieure à 20 ou 25 millimètres. Il convient d'ailleurs d'ajouter que la multiplication des lames d'air, en augmentant le nombre des surfaces de passage de la matière solide à l'air isolant, diminue par le fait même le coefficient de transmission de l'ensemble, à condition toutefois que, dans chacun des espaces d'air, celui-ci soit bien sec et à l'état de repos.

On réalise en particulier ce dernier état en emprisonnant l'air entre les parties ténues d'un corps ; l'ensemble formé par ces parties et par les masses d'air interposées possède des propriétés isolantes. C'est ainsi que les gros morceaux de charbon de bois sont bons conducteurs de la chaleur, tandis que le charbon de bois en paillettes constitue un milieu isolant, grâce aux bulles d'air qui s'y trouvent emprisonnées. Aussi le coefficient de conductibilité thermique d'un isolant dépend-il, comme nous l'avons vu plus haut, du poids de la matière solide contenue dans l'unité de volume, c'est-à-dire du degré de tassement de cette matière ou, suivant l'expression souvent employée, de la densité du bourrage.

9. — **Isolants à rejeter.** — La pratique a consacré l'emploi de quelques isolants et en a fait rejeter un grand nombre d'autres. Parmi ces derniers il convient de citer le crin animal, les plumes, la sciure de bois, la balle de riz, la balle d'avoine, la paille hachée, etc. ; ces substances fermentent facilement et peuvent servir d'asile aux rongeurs.

Les isolants les plus employés sont la *laine minérale ;* le *charcoal ;* le *liège* sous ses différentes formes, en particulier les agglomérés au brai.

10. — Laine minérale. — La *laine minérale*, qui se présente sous forme de fibres vitreuses, est un silicate complexe de magnésie, de chaux, d'alumine, de potasse et de soude. Elle est produite par l'action de la vapeur d'eau surchauffée sur un laitier constitué par un mélange de coke et de silicates et fondu dans une sorte de haut-fourneau. Cette substance est par elle-même assez bonne conductrice de la chaleur ; elle ne devient isolante que par l'air interposé entre les fibres. Aussi la densité du bourrage ne doit-elle pas être trop considérable ; elle ne doit pas dépasser 140 kilogrammes par mètre cube.

La laine minérale a l'inconvénient d'être très hygroscopique ; elle attire très facilement l'humidité et s'altère lorsqu'elle est humide. En particulier, si l'eau qui a imbibé ses fibres vient à se congeler, il y a réduction de celles-ci en une poussière qui se tasse et constitue un mauvais isolant. Aussi est-il bon de ne l'employer que dans des endroits parfaitement secs entre deux parois de bois tapissées intérieurement d'un papier imperméable, tel que le papier P. et B.

La laine minérale est incombustible ; elle éloigne les parasites. Ce sont ces propriétés qui ont conduit à l'employer dans l'isolation des chambres froides des navires, malgré son trop grand pouvoir hygroscopique.

La manipulation de la laine minérale est dangereuse ; les fibres piquent les mains des ouvriers et leur causent des blessures douloureuses ; les petites particules en flottement dans l'air pénètrent dans les bronches. Aussi aux Etats-Unis tente-t-on d'utiliser cette matière comprimée sous forme de plaques ou de briques. Il convient toutefois de remarquer que la conductibilité thermique de la laine comprimée est supérieure à celle de la laine en fibres.

11. — Charcoal. — Le *charcoal*, ou charbon de bois en paillettes, provient de la combustion en vase clos, soit de déchets de bois dur (buis), soit de déchets de bois tendre (rognures provenant des bobines de filature). Ces paillettes mesurent de 2 à 15 millimètres de longueur et de 1 à 15 millimètres de largeur. Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, le charcoal a l'inconvénient de se tasser ; de plus, il est combustible. Les revêtements faits de cette matière doivent donc être établis avec des précautions spéciales, afin d'empêcher les solutions de continuité dans les bourrages.

12. — Liège. — Le *liège* est actuellement un des isolants les plus employés dans l'industrie du froid. Il est utilisé soit sous forme de granules, soit sous forme de briques ou de plaques agglomérées.

13. — Liège granulé. — Le *liège granulé* pèse environ 80 kilogrammes par mètre cube ; sous

cette densité de bourrage il a un coefficient de conductibilité égal à 0,040. On l'emploie parfois pour exécuter des bourrages entre murs ou cloisons de bois. Il est en grains de 2 à 5 millimètres de diamètre et doit être soigneusement débarrassé par le blutage des impuretés et poussières. Grâce à son élasticité, il ne se tasse pas. Il présente cependant l'inconvénient d'être hygroscopique et putrescible. Aussi le liège aggloméré est-il préféré dans la pratique.

14. — **Lièges agglomérés**. — Les divers types de lièges agglomérés peuvent se répartir en deux groupes :

a) Les lièges dont tous les pores sont fermés, ce sont les *lièges comprimés*.

b) Les lièges qui présentent à la fois des pores ouverts et des pores fermés ; ce sont les *briques de liège*.

15. — **Briques de liège.** — Dans la fabrication de certaines sortes de *briques de liège*, on fait avec du liège granulé et un ciment liquide minéral ou organique une sorte de mortier. Celui-ci est modelé en briques, plaques, comme dans la fabrication des tuiles ; celles-ci sont soumises à une chaleur modérée et employées une fois séchées. D'autres variétés de briques de liège, dites *briques au brai*, sont obtenues en mélangeant aussi intimement que possible les granules de liège avec du brai liquide, et en laissant refroidir ce mélange dans des moules appropriés. Ces modes de fabrication donnent des lièges

présentant une certaine porosité, facile à reconnaître à ce fait que de l'eau, répandue sur la face supérieure d'une de ces briques, pénètre à l'intérieur et filtre au travers de la face inférieure ; la vitesse de cette pénétration de l'eau permet de juger du degré de porosité de la substance préparée. Aussi pour éviter une telle pénétration de l'eau, prend-on soin d'imprégner les briques ou plaques (une fois confectionnées) au moyen de brai liquide, en faisant agir la pression d'un côté de la brique et le vide de l'autre côté ; ce sont les briques de liège, dites marque *Reform*. Si de telles briques sont imperméables à l'eau, elles sont susceptibles de se désagréger sous l'action de la chaleur et ne présentent pas un volume absolument invariable. Le poids spécifique des agglomérés de liège du groupe précédent varie entre 200 et 350 kilogrammes par mètre cube ; on compte 100 à 150 kilogrammes par mètre cube de liège, le reste est le ciment. Le coefficient de conductibilité thermique est égal à 0,05 ou 0,06.

16. — Lièges comprimés. — Le *liège comprimé* tire son nom de son mode même de préparation : les granules de liège préalablement étuvés sont réduits par pression au 1/3 ou au 1/5 de leur volume, sans addition ou avec addition d'une très petite quantité de ciment organique. Un chauffage convenable, qui est poussé jusqu'à l'exsudation de la résine du liège, permet d'enlever l'humidité, sans que les matériaux perdent la forme qui leur a été donnée. Par suite de l'inévitable déformation des cellules du liège par la

pression, la densité du liège comprimé est comprise entre 250 et 300 kilogrammes par mètre cube. Sa conductibilité thermique est à peu près égale à celle des briques de liège dont il a été parlé plus haut.

17. — Expansit. — On s'est efforcé d'améliorer les propriétés du liège brut en le soumettant, à l'abri de l'oxygène de l'air, à un échauffement jusqu'à des températures comprises entre 300 et 400°, suivi d'un refroidissement dans un milieu inerte. Un tel traitement a pour effet de dilater les cellules du liège et de leur donner une sorte de tension ; le volume du liège est alors accru et peut passer du simple au double. D'où le nom d'*expansit* donné au produit ainsi obtenu.

A côté du phénomène physique de l'accroissement des cellules, le traitement thermique qui précède est accompagné d'une transformation chimique de la substance cellulaire, transformation qui se traduit par un brunissement intense de la matière. Environ 30 p. 100 du poids du liège passe à l'état de particules fluides. En même temps, la propriété qu'a le liège brut d'être hygroscopique et putrescible disparaît complètement, la substance est aussi peu mouillée par l'eau qu'une matière grasse ; elle peut rester très longtemps humide sans se pourrir, contrairement à ce qui arrive avec le liège brut.

Par compression on fait des *briques d'expansit* à partir du même produit granulé sans addition de ciment. On obtient une matière homogène, imperméable à l'eau et à l'air, qui peut rivaliser

à ce point de vue avec les meilleurs lièges comprimés, et qui présente sur eux l'avantage d'un moindre poids spécifique et d'un plus petit coefficient de conductibilité thermique. Le poids spécifique des briques d'expansit est égal à 80 kilogrammes par mètre cube ; le coefficient de conductibilité thermique est voisin de 0,04. Si l'on compare le poids des briques d'expansit nécessaire pour produire un certain isolement (coefficient de transmission de la chaleur égal à 0,20 par exemple), à celui des briques d'agglomérés ou du liège comprimé, on voit que le poids de la première substance est à peu près deux fois moindre que celui des lièges agglomérés ; il est à peu près trois ou quatre fois moindre que celui des lièges comprimés. Un tel avantage n'est pas à dédaigner, si on considère que la demande croissante du liège pour l'industrie frigorifique et celle du linoléum tend à faire monter le prix du liège brut.

Enfin, cette propriété de l'expansit de ne pas être hygroscopique permet de l'employer dans les bourrages à l'état granulé, ce qui est avantageux dans l'établissement des parois isolantes si contournées des chambres frigorifiques des navires.

De nouveaux isolants tendent à l'heure actuelle de s'introduire dans l'Industrie frigorifique.

18. — Ponce artificielle d'Ottmann. — Parmi eux la *ponce artificielle d'Ottmann* jouit, paraît-il, des propriétés suivantes :

a) Elle pèse en morceaux séparés suivant les grosseurs des grains de 127 à 250 kilogrammes par mètre cube ;

b) Elle n'a aucune action chimique sur le bois, le fer, le ciment et le plâtre.

c) Elle est tout à fait incombustible, insoluble dans l'eau et non hygroscopique.

d) En morceaux séparés elle peut être employée pour des bourrages isolants entre deux parois de bois ; son coefficient de conductibilité thermique est environ de 0,095.

e) En gâchant de la ponce artificielle avec du ciment de Portland on obtient un béton isolant dont le poids est compris entre 600 et 1 200 kilogrammes par mètre cube suivant les proportions de ciment et de ponce ; sa résistance à la compression est comprise entre 10 et 55 kilogrammes par centimètre carré. Un béton formé de 1 partie de ciment de Portland et de 8 parties de ponce artificielle a un coefficient de conductibilité thermique égal à 0,19.

f) En additionnant de sable le béton de ponce, on porte sa résistance à la compression à des valeurs comprises entre 34 et 60 kilogrammes par centimètre carré. Le poids spécifique atteint alors 1.900 kilogrammes par mètre cube.

On peut, en incorporant au béton des tiges de fer, obtenir des plaques armées ; ces plaques en béton additionnées de sable ont une résistance à la flexion qui va jusqu'à 120 kilogrammes par centimètre carré.

19. — Ciment de bois ou béton de bois. — En faisant un mélange aussi intime que possible de sciure de bois et de ciment de Portland, on obtient un *ciment de bois ou un béton de bois*. Il pèse de

900 à 950 kilogrammes par mètre cube ; il se laisse couper, percer et clouer comme le bois. Il n'est pas sensible à l'action de la gelée, et est incombustible. A l'état sec, son coefficient de conductibilité thermique est comparable à celui des briques de liège. Toutefois, il est perméable à l'eau ; dans les endroits où il peut être soumis à l'humidité, il est bon de recouvrir de brai sa surface extérieure.

20. — Coefficients de conductibilité thermique de quelques isolants et matériaux de construction. — En terminant ce chapitre donnons un tableau des valeurs *des coefficients de conductibilité thermique de divers isolants et matériaux de construction.* A côté de ces valeurs déduites de mesures faites dans les laboratoires, nous avons indiqué ces mêmes valeurs augmentées de 25 p. 100 ; ce sont ces dernières qu'il est prudent d'introduire dans les calculs d'isolements de chambres frigorifiques, afin de tenir compte des imperfections de la fabrication de l'isolant, de son application entre des murs qui ne sont pas parfaitement secs, des joints conducteurs qui servent à relier entre elles les différentes parties.

Coefficients de conductibilité thermique d'isolants et de matériaux de construction employés dans la pratique de l'industrie frigorifique.

(Exprimés en calories-kilogrammes par heure, pour 1° C. de différence de température entre les deux faces de l'isolant, par mètre carré de surface de transmission, pour 1 mètre d'épaisseur de l'isolant).

NOM DE L'ISOLANT	POIDS spécifique kilogram-mètre cube.	COEFFICIENTS DE CONDUCTILITÉ	
		Mesuré au laboratoire.	A employer dans les calculs d'isolement.
Air sec en repos	1,3	0,04	0,05
Air sec en mouvement		0,115	0,144
Charcoal	200	0,047 à 0,055	0,059 à 0,069
Coton	81	0,040 à 0,054	0,050 à 0,067
Feutre		0,03 à 0,07	0,037 à 0,088
Kieselguhr en poudre	250 à 350	0,13 à 0,14	0,13 à 0,175
Brique de kieselguhr cuite	300 à 450	0,06 à 0,08	0,075 à 0,10
Laine minérale	200 à 250	0,10	0,125
Liège granulé	80 à 120	0,04 à 0,07	0,05 à 0,087
Lièges agglomérés	200 à 350	0,05 à 0,08	0,062 à 0,10
Expansite	80	0,04	0,05
Tourbe	290 à 300	0,05 à 0,07	0,062 à 0,087
Brique de liège de 65^{mm} d'épaisseur recouverte sur ses deux faces d'une couche de 5^{mm} de cim.	446	0,06	0,075
Bois de pin, normalement aux fibres	546	0,13	0,16
Bois de pin, parallèlement aux fibres	551	0,30	0,37
Bois de teck, normalement aux fibres	642	0,15	0,19
Bois de teck, parallèlement aux fibres	604	0,32	0,40
Bois de chêne, normalement aux fibres	825	0,18	0,23
Bois de chêne, parallèlement aux fibres	819	0,31	0,39
Brique	1.500 à 1.800	0,35 à 0,45	0,43 à 0,57
Grès argilo-calcaire	1.660 à 2.000	0,80 à 1,10	1,00 à 1,40
Grès	2.250	1,27	1,60
Béton	2.050 à 2.200	0,70	0,90
Argile réfractaire	1.720	0,50	0,62
Plâtre à bâtir	1.250	0,37	0,46
Asphalte (pour plancher de frigorifique)	2.100	0,60	0,75

CHAPITRE V

CONSTRUCTION ET AMÉNAGEMENT D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

§ 1. — Mode de construction et d'isolement de l'édifice.

1. — Questions dont doit se préoccuper l'ingénieur chargé de dresser les plans d'un entrepôt frigorifique. — La construction et le mode d'aménagement d'un entrepôt frigorifique sont soumises à certaines règles que nous allons exposer avec le plus grand soin ; de leur observation dépend en effet le succès d'une installation.

L'ingénieur qui est appelé à dresser les plans d'un tel édifice doit se préoccuper :

a) De sa situation comme bâtiment isolé ou englobé dans d'autres constructions ;

b) De la nature du sol sur lequel doit être édifié l'entrepôt ;

c) De son mode d'utilisation et par suite de la construction et de l'isolement des diverses chambres froides :

d) De la ventilation, de l'éclairage et des canalisations de ces chambres ;

e) De leur mode de réfrigération.

2. — Orientation de l'entrepôt. — Un entrepôt frigorifique isolé et construit en étages au-dessus du sol doit d'abord être orienté de telle façon que sa façade principale soit exposée au nord, tandis que sa plus petite face se trouve à l'ouest. Il doit être abrité le plus possible contre l'action directe des rayons solaires. Tout ce qui est susceptible de produire de l'ombre sur les murs du bâtiment, par exemple des groupes d'arbres, peut être utilisé avec fruit.

3. — Choix du terrain sur lequel doit être bâti l'entrepôt. — Le terrain sur lequel s'élève l'entrepôt doit être choisi au voisinage d'une source, d'une rivière ou même d'un canal. On peut ainsi se procurer économiquement l'eau nécessaire au fonctionnement des machines frigorifiques ou des machines à vapeur qui les entraînent. La proximité d'un cours d'eau navigable permet en outre l'approvisionnement économique en charbon : elle est indispensable pour les entrepôts en relation avec les transports par eau.

L'eau fraîche en quantité suffisante est l'un des facteurs principaux de la production économique du froid : à défaut de source, rivière ou canal, il est bon, avant toute construction, de s'assurer la provision d'eau nécessaire, à l'aide d'un puits ordinaire ou d'un puits artésien.

4. — Isolation des fondations. Plancher isolant. — L'entrepôt frigorifique doit être établi sur un terrain aussi sec que possible ; la déperdition de froid par les maçonneries plongeant dans un sol

humide est énorme. On se trouve dans les meilleures conditions quand on peut bâtir sur le roc, comme on l'a fait à Montevideo pour l'abattoir de la *Frigorifica Uruguaya.* Dans les autres cas, il est nécessaire de faire reposer les murs sur un sol formé par exemple d'une couche de béton de scories, au-dessus de laquelle se trouvent du béton ordinaire et une couche de ciment ou d'asphalte.

Le mode suivant de construction des fondations est susceptible de donner d'excellents résultats [1]. Supposons que le bâtiment à ériger ait 10 mètres sur son plus petit côté. On établit d'abord un béton de $0^m,30$ à $0^m,40$ d'épaisseur, recouvert d'une couche d'asphalte ou de brai. On divise la largeur en 5 parties égales de 2 mètres et, au moyen de briques creuses, on voûte dans le sens de la longueur, sur du sable ou sur des cintres que l'on retire au fur et à mesure de l'avancement du voussage. Quand les cinq voûtes sont achevées, on remplit les reins avec du béton et on recouvre le tout d'une nouvelle couche d'asphalte ou de brai. De cette façon on obtient, entre les voussettes et le sol, des matelas d'air parfaitement imperméables et donnant un excellent isolement.

Sur une telle base on établit le plancher isolant, qui peut être constitué par des plaques d'agglomérés de liège recouvertes d'une chape de ciment.

1. De Beck. *La construction d'un frigorifique.* (Rapport présenté au premier Congrès International du froid, t. II, p. 474).

A titre d'exemple de fondations et de planchers isolants, citons le mode de construction employé récemment dans le frigorifique d'abattoir installé à Arnheim (Hollande).

Le terrain sur lequel est construit immédiatement le frigorique se compose d'une couche de sable du Rhin ayant environ 2 mètres d'épaisseur. Les fondations et le plancher isolants sont constitués à partir du sol par :

1° Une couche de béton de scories de 0m,50 d'épaisseur ;

2° Une couche de béton ordinaire de 0m,20 d'épaisseur ;

3° Des dalles de liège imprégné à la poix inodore (marque Reform) de 0m,12 d'épaisseur ;

4° Une couche de béton ordinaire de 0m,16 d'épaisseur ;

5° Une chape de ciment de 0m,02 d'épaisseur ;

6° Des carreaux de brique durcie au four et à surface supérieure cannelée.

Le tout a une épaisseur de 1 mètre environ.

Remarquons d'ailleurs qu'au point de vue de la déperdition du froid par les fondations, il y a intérêt à diminuer autant que possible la superficie de la base du bâtiment au profit de sa hauteur, comme on le fait souvent en Angleterre et aux États-Unis.

5. — Isolement des murs extérieurs de l'entrepôt. — Les murs extérieurs des entrepôts frigorifiques sont généralement en maçonnerie (briques, meulières ou moellons) ou en ciment armé. Ces murs doivent être *massifs*. La pratique, qui consiste à

ménager des matelas d'air à l'intérieur des maçonneries ou à y établir des bourrages isolants, doit être condamnée. L'air, en effet, ne peut rester stagnant à l'intérieur de ces murailles ; il y subit un perpétuel mouvement d'ascension et de descente, et détermine par suite, entre l'intérieur et l'extérieur des vides de la maçonnerie, un actif échange de chaleur. De même, les résultats obtenus par le remplissage des vides intérieurs de la maçonnerie au moyen de corps mauvais conducteurs, tels que scories, copeaux, tourbe, tan, ponce en gravier, etc..., n'ont pas été satisfaisants. Sans parler de la difficulté de se procurer de tels matériaux secs, de l'incommodité et de la perte de temps que présente leur pilonnage dans les vides de la maçonnerie en construction, les matériaux de remplissage seront rarement secs au moment de leur utilisation. Beaucoup des plus usuels, tels que copeaux, ponce en gravier, mâchefer ou scories, tourbe pulvérisée et tan, absorbent l'humidité de l'air durant leur transport et leur attente sur les chantiers ; durant l'érection de la maçonnerie, ils sont exposés à la pluie ; dans les vides étroits où on les introduit, ils aspirent l'humidité du mortier et restent encore exposés aux intempéries jusqu'à la fin du gros ouvrage.

L'isolement des murs massifs peut se faire soit par l'*extérieur*, soit par l'*intérieur* du bâtiment frigorifique.

L'isolement extérieur des murs au moyen d'un isolant imperméable à l'air et à l'eau (tel que les briques de liège imprégné de poix inodore)

présente des avantages considérables. La maçonnerie est mise à l'abri de l'humidité ; la filtration de l'air au travers de celle-ci est empêchée. L'influence directe des rayons du soleil sur les masses des murs à grande chaleur spécifique est annihilée. Les extrémités des poutres en fer ne traversent pas l'isolant et ne créent pas des solutions de continuité, causes de déperdition de frigories. Enfin, la maçonnerie refroidie joue le rôle d'un excellent isolant de froid, capable de réduire les variations de température des chambres durant l'arrêt des machines. Cet isolement extérieur présente cependant des difficultés réelles. Son application exige autant que possible que les murs soient complètement secs ; autrement leur séchage se fait par l'intérieur durant l'exploitation du frigorifique, ce qui nécessite une grande dépense de frigories.

Aussi l'isolement des murs se fait-il généralement à l'intérieur du frigorifique. Il faut alors éviter autant que possible les solutions de continuité dans l'isolement. Pour supprimer celles-ci, on a proposé récemment un système de construction, qui supporte tous les poids de l'édifice par l'intermédiaire de colonnes, et dans lequel les planchers ne vont pas jusqu'aux murs extérieurs. Ceux-ci peuvent alors être isolés intérieurement d'une manière continue ; il en est de même des planchers et des colonnes.

6. — Isolement intérieur des murs. Nécessité d'un réservoir de froid. — L'isolement intérieur des murs peut se faire de diverses manières.

L'isolation au moyen de matériaux de remplissage légers, en vrac, tels que laine minérale, charcoal, liège granulé, etc., appliqués entre plusieurs couches de planches tapissées d'un papier isolant qui rend les cloisons imperméables à l'air, a pris une certaine extension, notamment en Angleterre. Pourvu que les matériaux de remplissage soient appliqués avec l'épaisseur voulue et que les cloisons en bois qui les renferment soient étanches à l'air, on obtient un réel succès. Toutefois, ces isolations prennent beaucoup de place et entraînent un accroissement du prix de revient des constructions brutes. D'autre part, de telles constructions sont sujettes aux incendies. Les matériaux employés peuvent parfois subir une altération par l'humidité, par suite dégager de mauvaises odeurs.

Enfin, ce système de revêtement des murs au moyen de matériaux de remplissage en vrac, en combinaison avec des parois de bois, ne donne pas un *réservoir de froid* suffisant. C'est un point sur lequel nous allons insister ici [1].

Pour des raisons d'économie dans le service des installations frigorifiques et spécialement dans les petites exploitations, on limite de plus en plus l'arrivée d'air froid dans les chambres de conservation des denrées ; aujourd'hui les installations frigorifiques, qui ne fonctionnent que six à douze heures par jour, sont de règle pour les

1. Ces considérations sont empruntées au rapport remarquable présenté par M. Vogt au premier Congrès international du froid.
Vogt, *Expérience acquise sur les matériaux d'isolation calorifuge* (t. II, p. 571).

laiteries, boucheries, etc... Cependant, pour beaucoup d'entre elles, on a constaté que, malgré l'emploi d'excellentes machines et de la meilleure isolation, il n'était pas possible, même durant de courts arrêts de marche, de maintenir, fût-ce approximativement, la température désirée dans les chambres. La cause de ces faits réside dans le manque d'une suffisante réserve de froid à l'intérieur de l'isolation des locaux réfrigérés.

Supposons une chambre frigorifique, construite en maçonnerie massive, parfaitement isolée de tous côtés à l'intérieur par un remplissage de matières en vrac entre deux cloisons de planches. On pourra abaisser la température d'une telle enceinte en peu de temps et sans grande dépense de froid. La raison de ce fait se trouve non seulement dans la très faible capacité calorifique de l'air emprisonné, mais encore dans celle de l'isolation qui l'entoure. Malgré son épaisseur de 20 à 30 centimètres, la température de cette dernière peut en effet être facilement abaissée, grâce à la faible chaleur spécifique des matériaux en vrac et légers, qui la composent.

Admettons que les machines frigorifiques soient arrêtées, dès que la température de zéro est atteinte dans la chambre. Supposons d'autre part que la chambre de réfrigération mesure 20 mètres carrés de superficie (rectangle de 4×5 mètres) et 3 mètres de hauteur. Si la rentrée de chaleur par heure, par mètre carré de surface enveloppante et pour 1° C de différence de température entre l'intérieur de la chambre et l'extérieur est réduit à $0^{\text{cal.-kg.}},30$, il entrera par

heure dans la chambre, pour une différence de 25 degrés entre l'intérieur et l'extérieur

$$94\ (m^2) \times 0{,}30 \times 25 = \mathbf{705}\ \text{calories-kilogrammes.}$$

En raison de la faible chaleur spécifique de l'air comme de celle de l'isolation environnante, l'apport de minimes quantités de chaleur suffit pour élever la température de l'isolation et de l'atmosphère qu'elle emprisonne. L'apport, par heure, de 700 calories environ suffira donc pour échauffer le local vide en quelques heures, en dépit de la meilleure isolation.

Si la même chambre est convenablement remplie de marchandises à refroidir, il sera nécessaire de faire un apport énergique de frigories pour abaisser au degré voulu la température de ces denrées. Mais inversement, après arrêt du refroidissement, il faudra de nouveau qu'une grande quantité de chaleur vienne pénétrer dans la chambre pour relever la température des marchandises réfrigérées ; les 700 calories traversant par heure les parois de la chambre ne pourront qu'en faire croître très lentement la température. Ainsi la température d'un même local frigorifique s'élève plus ou moins vite, entre les périodes de refroidissement, selon la quantité de marchandises qui s'y trouve et suivant la chaleur spécifique de celles-ci.

Dans les petites installations frigorifiques dont l'approvisionnement varie fréquemment et où la réfrigération est intermittente, on ne peut compter avoir en permanence dans les chambres une quantité de marchandises assez grande pour obtenir

une constance suffisante de la température. Il a donc été nécessaire, pour de telles installations à réfrigération intermittente, de constituer à l'in-

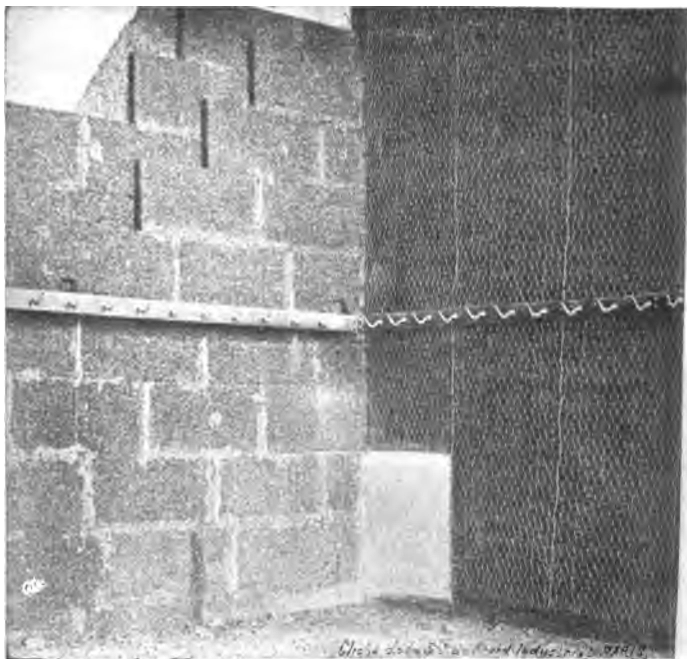


Fig. 59. — Diverses phases de l'isolation des parois d'une chambre froide.

térieur de la chambre des réservoirs de froid, formés par des corps denses à grande chaleur spécifique.

On y est parvenu en particulier en revêtant intérieurement les murs des chambres avec des

briques de liège aggloméré (fig. 59), recouvertes d'un enduit de ciment, de carreaux, ou d'une maçonnerie plus ou moins épaisse, en briques vernies ou non. C'est ainsi qu'au Frigorifique de la Bourse du Commerce (tout entier en sous-sol), l'épaisseur du revêtement isolant (formé de liège imprégné à la poix inodore, marque Reform) atteint $0^{m},24$ pour les parois extérieures, les plafonds et les planchers ; cet isolant est recouvert d'une couche de ciment armé de $0^{m},03$ d'épaisseur. Prenons une chambre ayant pour dimensions intérieures $5 \times 4 \times 3$ mètres : la chape de $0^{m},03$ de ciment également répartie sur toutes les faces a un volume égal à $1^{m3},42$; l'isolement d'épaisseur égale à $0^{m},24$, également répandue sur toutes les faces a un volume égal à $12^{m3},155$. Si on admet 1.500 kilogrammes pour le poids du mètre cube de l'enduit de ciment armé et 300 kilogrammes pour le poids du mètre cube de liège aggloméré, le poids du revêtement intérieur des murs de la chambre est

$$1,42 \times 1.500 + 300 \times 12,155 = \mathbf{5.776^{kg},5}.$$

En adoptant 0,25 comme chaleur spécifique de ce revêtement on voit qu'il faut fournir à ce revêtement

$$5.776,5 \times 0,25 = \mathbf{1.444} \text{ calories-kilogrammes environ}$$

pour élever sa température de 1 degré. On a donc constitué à l'intérieur de la chambre, un réservoir de froid capable d'empêcher le relèvement de sa température.

Au frigorifique de l'abattoir d'Arnheim, on a

d'abord construit un mur extérieur de $0^m,22$ d'épaisseur, contre lequel on a appliqué, par l'intermédiaire d'une couche de poix inodore, un revêtement de liège imprégné présentant $0^m,15$ d'épaisseur, recouvert à son tour d'une couche de $0^m,02$ de ciment armé. De plus, afin de constituer un puissant isolant de froid, capable de maintenir constante la température intérieure de la chambre, on a établi un second mur intérieur en briques de $0^m,44$ d'épaisseur, qui se trouve ainsi séparé du premier par le revêtement isolant. Enfin, les chambres froides sont tapissées intérieurement jusqu'à une hauteur de $2^m,75$ environ avec des briques émaillées de dimensions $0^m,22 \times 0^m,12 \times 0^m,03$. Un tel mur présente ainsi une épaisseur totale de $0^m,85$ environ.

7. — **Poutres**. — Les *poutres*, qui supportent les planchers du bâtiment frigorifique, peuvent être en bois (chêne ou pitchpin) ou en fer. Dans ce dernier cas, elles doivent être soigneusement isolées.

8. — **Plafonds et cloisons**. — Les *plafonds et les cloisons* des chambres, qui sont maintenues à des températures différentes, doivent être soigneusement isolés. Au frigorifique de la Bourse du Commerce, les cloisons séparatives présentent un isolement en agglomérés de liège ayant $0^m,16$ d'épaisseur, avec un revêtement superficiel de $0^m,03$ de ciment. Dans le même entrepôt, le plancher, qui sépare les deux étages, est en fer et béton armé, avec revêtement en plaques de liège

imprégné et dallage en ciment armé ; il peut porter 1.200 kilogrammes par mètre carré. Au frigorifique de l'abattoir d'Arnhein, le plafond des chambres froides est formé d'une couche de $0^m,12$ de béton armé, au-dessus de laquelle se trouve du béton de laitier, recouvert à son tour de plaques de liège imprégné de $0^m,12$ d'épaisseur avec un revêtement de ciment d'une épaisseur de $0^m,03$.

9. — Toit. — Lorsque le *toit* du bâtiment frigorifique est plat, il peut être constitué, soit par une assise de béton recouverte d'asphalte, soit par du bois recouvert d'asphalte. Au frigorifique d'Arnheim, la couverture en bois, qui a $0^m,03$ d'épaisseur, est recouverte de 4 couches d'asphalte.

10. — Hauteur des salles. — Pour déterminer la *hauteur des salles*, il y a lieu de tenir compte de leur destination ; cependant une hauteur de $2^m,50$ à 3 mètres convient pour la plupart des produits à conserver.

11. — Sas d'air. — A l'entrée de chaque salle il est utile, pour éviter les pertes de froid résultant de l'ouverture des portes, d'aménager un *tambour* ou *sas d'air* ou *petite antichambre*, de telle façon que l'on doive toujours refermer la première porte avant de pouvoir ouvrir la seconde et vice versa.

12. — Portes des chambres froides. — Les *portes* des chambres froides doivent être isolantes ; elles

doivent présenter une fermeture hermétique, être d'une manutention commode et pouvoir s'ouvrir aussi bien de l'intérieur que de l'extérieur. Les portes, d'une épaisseur minima égale à $0^{m},20$, sont rendues isolantes au moyen d'un matelas, ayant $0^{m},08$ à $0^{m},10$ d'épaisseur, fait de liège, de



Fig. 60. — Hôpital maritime de Toulon. Vue du bac générateur de glace et de l'entrée (porte) de l'une des chambres frigorifiques destinées à la conservation des denrées périssables (construction de la Société du Froid Industriel à Paris).

laine minérale ou de tourbe, disposé entre deux épaisseurs de bois. La fermeture hermétique est obtenue au moyen de bandes de feutre ou de caoutchouc (fig. 60).

13. — Éclairage. — L'*éclairage* des chambres froides se fait avec des lampes à incandescence. Toutefois, quand cela est possible, il est préférable d'éclairer largement avec la lumière du

jour, qui permet de ne pas laisser des coins sombres, susceptibles de devenir des réceptacles d'ordures. Des baies vitrées de $1^m,50$ sur $1^m,75$ présentent de bonnes dimensions. On les garnit avec des dalles massives ou creuses en verre dépoli ou vert; entre celles-ci on dispose des matelas d'air de $0^m,08$ à $0^m,10$.

§ 2. — Le refroidissement des chambres de conservation.

1. — Frigories nécessaires pour la réfrigération et le desséchement de l'air d'une chambre. — Pour obtenir une bonne conservation des denrées, il faut que l'air des chambres soit non-seulement amené à une température basse, mais encore à un certain degré de siccité et de pureté. Nous allons maintenant étudier les divers modes de refroidissement des chambres d'un entrepôt.

Rendons-nous compte d'abord du nombre de frigories nécessaires pour refroidir et dessécher un volume donné d'air humide. Supposons qu'il s'agisse de 1.000 mètres cubes d'air dont l'état hygrométrique est égal à 0,9 à $+ 10^\circ$ et qui sont amenés à l'état de saturation à la température de $- 2^\circ$ C. Si on néglige les variations du poids de l'air sec avec la température et la pression, le nombre de frigories, qu'il faut produire pour amener l'air sec de $+ 10^\circ$ à $- 2^\circ$, est

$$1.000 \times 1,3 \times 12 \times 0,238 = \mathbf{3.713} \text{ frigories environ.}$$

Dans cet abaissement de température il s'est déposé

$$1.000\,[0,00936 \times 0,9 - 0,00425] = \mathbf{4^{kg},174} \text{ d'eau.}$$

(0,00936 et 0,00425 représentant les poids d'eau en kilogrammes contenus dans un mètre cube d'air saturé à + 10° et à — 2°).

D'autre part, la condensation de 1 kilogramme d'eau dégage 610 calories. Il faudra donc, pour absorber la condensation de l'eau déposée par les 1.000 mètres cubes d'air, produire

$$4{,}174 \times 610 = \mathbf{2.546^{frig.},14}.$$

Il faudra donc produire environ 6.259 frigories pour absorber la chaleur dégagée par les 1.000 mètres cubes d'air humide se refroidissant de + 10° C. à — 2° C.

2. — Frigorifères. — Ce refroidissement et ce desséchement de l'air des chambres se font en amenant cet air au contact de milieux refroidis par des machines frigorifiques. On donne à ces milieux le nom de *frigorifères*.

A ce point de vue, le frigorifère avec lequel l'air des chambres vient en contact et qui est refroidi, peut être *solide ou liquide*. D'où la distinction des frigorifères en :

a) *Frigorifères secs ;*

b) *Frigorifères humides.*

3. — Frigorifères secs. — Les *frigorifères secs* sont généralement constitués par des tuyaux dans lesquels circule soit de la saumure froide, soit l'agent frigorifique qui évolue dans la machine même. Dans le premier cas, on dit que le frigorifère sec est à *circulation de saumure ;* dans le second cas, il est à *détente directe* et fait partie du réfrigérant de la machine frigorifique.

4. — **Frigorifères humides.** — Dans les *frigorifères humides*, l'air à refroidir et dessécher vient en contact avec de la saumure froide. Afin de rendre le contact aussi intime que possible, on tamise l'air au travers d'une pluie du liquide froid; on réalise ainsi le *frigorifère à pluie de saumure* (fig. 61). On peut aussi amener l'air au contact de disques métalliques, sur lesquels est répandue une petite couche de saumure froide; on les distingue en *frigorifères*



Fig. 61. — Frigorifère à pluie de saumure.

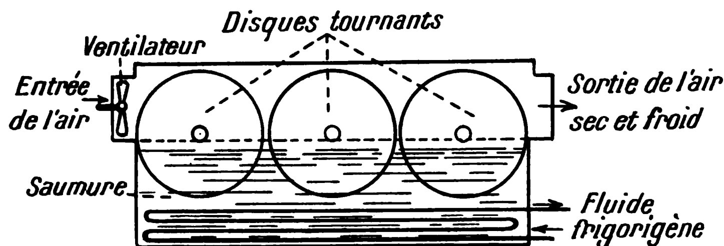


Fig. 62. — Schéma d'un frigorifère à disques, type Linde.

à disques (fig. 62) et *frigorifères à ruissellement.*

Dans ces frigorifères humides, l'air se refroidit

et se dessèche, jusqu'à ce que la tension de la vapeur d'eau soit devenue égale à la tension de la vapeur saturée émise par la dissolution saline refroidie. On sait que cette dernière tension est d'autant plus faible que la saumure est plus concentrée et qu'elle est plus froide. C'est ainsi qu'une dissolution de sel marin contenant 20 p. 100 de sel (100 kilogrammes de dissolution contiennent 80 kilogrammes d'eau et 20 kilogrammes de sel) émet de la vapeur d'eau dont la tension, à une certaine température, est les $\frac{85}{100}$ de la tension de la vapeur émise par l'eau pure à la même température.

En même temps qu'il se refroidit et se dessèche au contact des frigorifères, l'air se purifie en abandonnant dans l'eau condensée les poussières et les bactéries qu'il contient.

Le frigorifère humide est nécessairement extérieur aux chambres froides ; il est placé dans un local spécial à parois bien isolées. Des ventilateurs aspirent l'air humide, chaud et impur des chambres, le font passer dans le frigorifère, puis le ramènent aux chambres sec, froid et purifié. Le départ et l'arrivée de l'air se font dans des canaux en bois, dont le réseau se trouve suspendu au plafond de la chambre froide ; ces canaux sont munis de registres, qui permettent le réglage du courant d'air.

5. — **Circulation naturelle ou artificielle de l'air dans les frigorifères.** — Les frigorifères secs peuvent être placés soit en dehors des chambres, comme les frigorifères humides ; soit dans ces chambres

elles-mêmes. Ils sont alors formés de tuyaux qui tapissent soit le plafond, soit les parois de la chambre. Dans le premier cas, des ventilateurs sont nécessaires pour produire la circulation de l'air, comme nous venons de le voir. Dans le second cas, les différences de température, créées par la présence des tuyaux froids le long des parois d'une chambre, donnent naissance à une circulation *naturelle* sans ventilateur (par opposition avec la circulation *artificielle* au moyen de ventilateurs). Si les tuyaux froids sont suspendus, comme cela arrive le plus souvent, au plafond de la chambre, l'air refroidi à leur contact descend vers le plancher, tandis que l'air réchauffé monte vers le plafond.

Il convient de multiplier et de disposer les batteries de tuyaux froids, de telle façon que les différences de température dans un même local n'excèdent pas un degré.

Le dispositif par frigorifère placé en dehors de la chambre froide convient plus particulièrement au cas où l'air doit être assez fortement desséché, comme c'est le cas des chambres de conservation des viandes réfrigérées, dont le degré hygrométrique doit descendre jusqu'à 0,70. Le frigorifère intérieur aux chambres et la circulation naturelle s'appliquent lorsque le degré d'humidité n'est pas trop réduit, comme dans les caves de garde des brasseries ou dans les glacières.

6. — **Dégivrage des tuyaux des frigorifères secs.** — Dans les frigorifères secs, l'eau provenant de la dessiccation de l'air se dépose à l'état de givre à

la surface des tuyaux froids. Or, cette glace est mauvaise conductrice de la chaleur; son accumulation sur les surfaces extérieures des tuyaux diminue peu à peu l'effet frigorifique. Il est donc nécessaire d'enlever de temps en temps la couche de glace qui s'est formée; c'est l'opération du *dégivrage*. Dans les locaux où la température reste supérieure à zéro, il suffit d'arrêter pendant le temps voulu la circulation dans une partie des tuyaux producteurs du froid. Cela n'est pas possible, quand la température du local doit rester inférieure à 0°. Il faut alors, soit enlever la glace à la main, ce qui est compliqué; soit provoquer un dégel partiel, en faisant circuler dans les tuyaux, soit de la saumure chaude (refroidissement par circulation de saumure), soit du fluide frigorifique chaud (détente directe), en mettant les tuyaux en relation avec le condenseur de la machine frigorifique. La couche de glace se décolle. Il convient de la recueillir en l'empêchant de tomber sur le sol et surtout sur les denrées. En général, les dispositifs pratiques de dégivrage manquent dans la plupart des installations.

Il convient toutefois de signaler le dispositif de dégivrage par ruissellement de saumure à la température ordinaire, adopté par la maison Sulzer pour les frigorifères secs extérieurs de l'abattoir frigorifique *Frigorifica Uruguaya à Montevideo*. Lorsque les tuyaux de ces frigorifères sont givrés, on fait tomber sur eux une pluie de saumure au moyen de tuyaux étamés intérieurement et percés de trous. La saumure étendue par l'eau de fusion de la glace est ensuite concentrée

comme nous l'indiquons à la fin de ce chapitre. Afin de faciliter ce nettoyage au moyen de la pluie de saumure, les tuyaux du frigorifère sont droits avec coudes rapportés.

Lorsqu'on arrête la circulation du liquide froid dans les tuyauteries des chambres, le givre déposé sur ceux-ci fond au bout d'un certain temps. L'eau qui dégoutte doit être recueillie dans des *gouttières* en bois garnies de tôle à l'intérieur. Ces gouttières doivent être assez larges pour recueillir l'eau sans gêner la circulation de l'air; elles doivent avoir une pente suffisante dont il faut tenir compte pour le calcul de la hauteur disponible des locaux.

7. — Tuyaux des frigorifères secs, leurs dimensions, leur effet de réfrigération. — Les tuyaux des frigorifères secs appartiennent à deux types principaux :

a) *Les tuyaux à surface extérieure lisse;*

b) Les tuyaux sur lesquels sont enfilés des disques séparés ou *tuyaux à ailettes.*

Ces tuyaux diffèrent suivant qu'il s'agit d'une installation à refroidissement par circulation de saumure — ou d'une installation à réfrigération par détente directe.

I. — α) Pour la *circulation de saumure*, les tuyaux lisses sont étirés, colletés, avec brides folles; ils ont 5 mètres, 4 mètres, et même 2 mètres de longueur ; leur diamètre intérieur est égal à 51 millimètres; leur paroi a une épaisseur de 3 millimètres, de telle sorte que leur diamètre extérieur est égal à 57 millimètres; la distance des axes

de deux tuyaux parallèles est comprise entre 130 et 150 millimètres. Un mètre de ces tuyaux correspond à une surface extérieure de refroidissement égale à $0^{m^2},169$; un mètre carré de surface refroidissante extérieure correspond à une longueur de 6 mètres de ces tuyaux. Une longueur de 1 mètre de ces tuyaux contient environ 2 litres de saumure.

Ces tuyaux sont essayés à la pression de 5 atmosphères.

β) Quant à la production des frigories, elle dépend, entre autres facteurs, de la vitesse de circulation de l'air autour de la surface extérieure du tuyau.

Lorsque la circulation de l'air est naturelle (sans ventilateur) on peut compter sur une production de 5 frigories par heure, par mètre carré de surface de refroidissement et par degré de différence de température entre la saumure et l'air, lorsque cette différence ne dépasse pas 5 degrés ; lorsque cette différence atteint 9 degrés, la production des frigories monte à 10.

Lorsque la circulation de l'air autour des tuyaux du frigorifère se fait au moyen d'un ventilateur, la production des frigories s'élève à 20 par heure, par mètre carré de surface radiante et par degré de différence de température entre la saumure et l'air (vitesse de circulation de l'air égale à environ 3 mètres par seconde) ; la différence de température entre la saumure et l'air n'intervient pas quand la vitesse de circulation est supérieure à 1 mètre par seconde.

γ) Les tuyaux à ailettes en fonte ont 70 et 75 mil-

limètres de diamètre intérieur; ils se construisent en longueurs égales à 2 mètres; 1^m,50; 1 mètre. Le diamètre des ailettes est égal à 170, 172 et 195 millimètres. Les nombres d'ailettes au mètre courant sont : 24 [tuyaux de 75 millimètres de diamètre intérieur et d'ailettes de diamètre égal à 195 millimètres]; 46 [tuyaux de 70 millimètres de diamètre intérieur et d'ailettes de diamètre égal à 172 millimètres]; 34 et 46 [tuyaux de 70 millimètres de diamètre intérieur et d'ailettes de diamètre égal à 170 millimètres]. La surface extérieure de refroidissement est, par mètre courant :

1^{m2},50 [tuyaux de 24 ailettes ayant un diamètre égal à 195 millimètres];

2 mètres carrés [tuyaux de 46 ailettes ayant un diamètre égal à 172 millimètres];

1^{m2},60 [tuyaux de 34 ailettes ayant un diamètre égal à 170 millimètres];

2 mètres carrés environ [tuyaux de 46 ailettes ayant un diamètre égal à 170 millimètres].

Comme la radiation par les ailettes diminue vers la périphérie, un mètre carré de surface d'échange produit par heure et par degré de différence de température entre la saumure et le milieu extérieur environ les 2/5 des frigories produites par les tuyaux lisses, soit 2 à 4 frigories dans la circulation naturelle, et 8 frigories dans la circulation de l'air au moyen d'un ventilateur.

δ) Prenons un exemple. Supposons que nous devions, pour maintenir à + 1° C. la température d'une chambre froide, y produire 3.000 frigories

par heure, avec un frigorifère sec à circulation de saumure à une température de — 4° C. Si on fait circuler l'air au moyen d'un ventilateur avec une vitesse de 3 mètres par seconde environ, et si on emploie des tuyaux lisses, on produit par heure et par mètre carré de surface d'échange de chaleur

$$20\,[4 + 1] = \mathbf{100} \text{ frigories.}$$

Il faudra donc $\frac{3.000}{100} = 30$ mètres carrés de surface de refroidissement, soit une longueur de tuyaux lisses égale à $30 \times 6 = 180$ mètres, ou un poids de tuyaux égal à 540 kilogrammes [3 kilogrammes au mètre courant].

Si, au lieu de tuyaux lisses, on se sert de tuyaux à ailettes en fonte, il faudra une surface de refroidissement égale à

$$\frac{3.000}{8 \times 5} = \mathbf{75} \text{ mètres carrés environ,}$$

ou une longueur de tuyaux égale à

$$\frac{76}{1{,}50} = \mathbf{50} \text{ mètres [ailettes de } \mathbf{195} \text{ millimètres];}$$

ou

$$\frac{76}{2} = \mathbf{37^m{,}50} \text{ [ailettes de } \mathbf{172} \text{ millimètres].}$$

Les premiers tuyaux pèseront 1.700 kilogrammes [34 kilogrammes au mètre courant] et les seconds 1.312 kilogrammes environ [35 kilogrammes au mètre courant].

II. — Les tuyaux lisses employés dans la réfrigération par *détente directe* sont en acier (ammo-

niaque et acide carbonique) ou en cuivre (acide sulfureux). On les fait aussi longs que possible, afin de diminuer le nombre des raccords. Les plus usités ont 26 millimètres de diamètre intérieur et 34 millimètres de diamètre extérieur; la distance des axes de deux tuyaux parallèles est égale à 90 millimètres. Avec circulation de l'air au moyen d'un ventilateur, si le tuyau n'est pas givré, on peut compter sur une production de 30 à 40 frigories par heure, mètre carré de surface de refroidissement et degré de différence de température entre le fluide intérieur au tuyau et le milieu extérieur; quand le tuyau est fortement givré, cette production descend à 10 frigories; en moyenne on peut admettre une production de 20 à 25 frigories (vitesse de circulation de l'air égale à environ 3 mètres par seconde).

On emploie aussi des tuyaux à ailettes en acier, qui se font en longueurs allant jusqu'à 6 mètres. Les plus employés ont 41 millimètres de diamètre intérieur, 48 millimètres de diamètre extérieur; le diamètre des ailettes est égal à 140 millimètres, et leur nombre est de 55 au mètre courant; la surface radiante est égale à environ $1^{m^2},60$ par mètre courant. La distance de deux tuyaux parallèles est égale à 300 millimètres environ. Avec de tels tuyaux, et une circulation de l'air au moyen d'un ventilateur, on peut compter sur une production de 12 frigories par heure, par mètre carré de surface radiante externe, et par degré de différence de température entre l'agent frigorifique et l'air extérieur (vitesse de circulation de l'air égale à environ 3 mètres par seconde).

8. — Frigorifères humides. Dimensions et effet réfrigérant. — A côté des frigorifères secs intérieurs ou extérieurs aux chambres froides, on emploie souvent les frigorifères humides constitués par des chambres soigneusement isolées, dans lesquelles on met l'air à refroidir et à dessécher en contact direct avec la saumure froide. Cette saumure peut tomber en nappes le long d'une suite de gradins horizontaux (frigorifères à pluie de saumure) (fig. 61) ; ou ruisseler, soit le long des deux parois de tôles verticales ondulées, soit sur des tuyaux lisses (frigorifères à ruissellement) ; ou enfin être répandue sur les deux faces supérieures verticales de disques en tôle tournant lentement autour d'un axe horizontal et plongeant par leur partie inférieure dans la saumure froide (frigorifères à disques) (fig. 62). L'air quitte le frigorifère saturé de vapeur d'eau à la température de la saumure. Il entraîne de la saumure liquide; aussi doit-on le faire passer au travers d'un filtre qui arrête les particules de saumure. D'ailleurs, pour que cet entraînement soit aussi faible que possible, il faut que la vitesse de circulation de l'air dans le frigorifère ne dépasse pas $1^m,50$ à 2 mètres par seconde.

Les dimensions de ces frigorifères peuvent être établies d'après les règles suivantes.

Dans les frigorifères à pluie d'eau salée, il faut compter une production de 500 frigories par heure, par mètre cube de l'espace isolé dans lequel ruisselle la saumure et par degré de différence de température entre la saumure et l'air pris à une température moyenne entre ses deux tempéra-

tures à l'entrée et à la sortie du frigorifère. Les frigorifères à ruissellement produisent 30 frigories par heure, par mètre carré de surface froide et par degré de différence de température entre la saumure et l'air à une température moyenne entre ses deux températures à l'entrée et à la sortie du frigorifère (vitesse de circulation de l'air, 2 mètres par seconde).

Quant au frigorifère à disques, il produit 7 à 8 frigories par heure, par mètre carré de la surface des plaques (2 faces) en contact avec l'air et par degré de différence de température entre la saumure et l'air à la température moyenne déjà définie plus haut, lorsque la surface plongée des disques est le 1/3 ou le 1/4 de leur surface totale et lorsque les disques tournent avec une vitesse de 5 à 8 tours par minute : la puissance nécessaire pour faire tourner chaque axe porteur de disques varie de 0,3 à $0^{ch},5$.

9. — Concentration et aseptisation de la saumure des frigorifères. — Dans les frigorifères à bain salé, celui-ci est dilué par l'absorption de l'humidité de l'air; il est de plus pollué par les bactéries de l'air venant des chambres. Il faut concentrer et aseptiser la saumure. On obtient ce résultat en portant la saumure à température élevée. Pour cela on la fait ruisseler sur un serpentin vertical, chauffé à l'eau chaude ou à la vapeur. On échauffe d'ailleurs préalablement la solution pauvre allant à l'évaporateur au moyen de la solution riche et chaude.

Souvent on escompte l'action antiseptique du

sel de la saumure, lorsque celle-ci est suffisam-



Cliché Ozonair à Paris.

Fig. 63. — Batterie d'électrodes pour la production de l'ozone. Type dit à *batterie fermée* (construction Ozonair à Paris).

La batterie d'électrodes est enfermée dans une boite, munie à sa base d'un filtre en ouate interchangeable ; la partie supérieure est raccordée par un tuyau en tôle galvanisée à la conduite d'aspiration ou de refoulement du ventilateur. L'ozone, se formant par la décharge électrique entre les électrodes séparées par du mica, est aspiré par le courant d'air du ventilateur et mélangé à l'air de ventilation.

ment concentrée. Dans ce cas, on laisse perdre une partie du bain de saumure par un trop plein;

on ajoute de temps en temps une certaine quantité de sel.



Cliché Ozonair à Paris.

Fig. 64. — Batterie d'électrodes pour la production de l'ozone. Type dit à *batterie ouverte* (construction Ozonair à Paris).

L'air à ozoniser doit traverser un filtre et la batterie est montée directement dans la conduite d'air.

10. — Renouvellement de l'air des chambres de con-

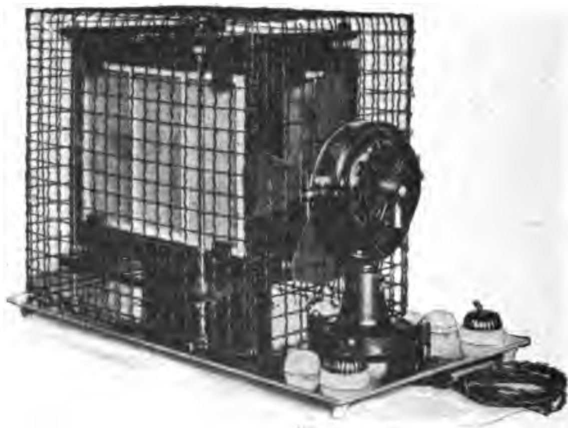


Cliché Ozonair à Paris.

Fig. 65. — Générateur d'ozone, type Ozonair à Paris.

servation. — Chaque fois que le refroidissement des denrées a lieu par contact direct avec l'air en

circulation dans les chambres de conservation ou lorsque ces denrées dégagent une odeur, un appel intermittent d'air frais venant de l'extérieur et une évacuation de l'air vicié sont indispensables. Il est nécessaire que l'air pur, ainsi introduit dans



Cliche Ozonair a Paris.

Fig. 66. — Générateur d'ozone (système Ozonair) transportable. Ozonisation de l'air des magasins de vente de l'industrie alimentaire (boucheries, charcuteries, etc.).

les chambres, soit refoulé d'abord dans le frigorifère où il se refroidit, se dessèche et se purifie, tandis que l'air vicié des chambres s'échappe directement à l'extérieur. On admet que, dans une chambre à viande, un tel renouvellement total de l'air doit se faire environ quatre fois par vingt-quatre heures.

11. — Emploi de l'ozone. — On peut avoir intérêt, dans certains cas, à ozoniser l'air introduit

dans les chambres. A la maison Christen de Bâle, on a constaté que les marchandises ne prenaient pas le goût de l'ozone, qu'aucune action nuisible n'était constatée sur les organes de la respiration, que les odeurs étaient supprimées par l'action de l'ozone. L'installation a été faite par la maison Ozonair de Paris, au moyen des appareils représentés sur les figures 63 à 67.



Cliché Ozonair à Paris.

Fig. 67. — Ventilateur à ozone transportable sur roulettes (construction Ozonair à Paris).

12. — Dimensions des chambres froides. — Les dimensions des chambres froides sont spéciales à chaque sorte de denrées. On peut seulement dire en général que ces dimensions seront telles que l'air froid puisse circuler librement autour des denrées périssables soumises à la conservation.



CHAPITRE VI

LES ENTREPOTS FRIGORIFIQUES

§ 1. — Le fonctionnement d'un entrepôt frigorifique pour toutes denrées.

Dans les chapitres suivants, nous étudierons plus spécialement la conservation de la viande



Fig. 68. — Chambre froide pour la conservation des viandes. (Loges à parois formées de fers ronds).

et du poisson. Nous allons indiquer ici simplement le régime de fonctionnement des chambres

dans lesquelles on conserve d'autres denrées, telles que la volaille et le gibier, les fruits et légumes, le beurre, les œufs, etc...

D'une manière générale, les chambres de conservation sont divisées en loges louées à chaque déposant. Les parois de ces loges sont grillagées



Fig. 69. — Chambre froide pour la conservation de la volaille et du gibier.

de manière à permettre la circulation de l'air froid. Dans les chambres à viande, ces parois sont entièrement métalliques (fig. 68), comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Dans les chambres où la température est maintenue au-dessous de zéro, les parois des loges sont faites de cadres en pitchpin, dont les montants sont reliés par un grillage en fil de fer galvanisé.

1. — Conservation de la volaille et du gibier. — La *volaille et le gibier* sont conservés congelés à une température de — 6° à — 8° C. (fig. 69, 70, 71). Les différentes pièces doivent être soigneuse-



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 70. — Chambre froide pour denrées alimentaires du Palace Hôtel à Caux près de Montreux (construction Sulzer).

ment vidées. Les lapins et les lièvres ne sont pas nécessairement écorchés. La volaille et le gibier à plume doivent autant que possible être plumés ; chaque pièce doit être enveloppée dans un papier spécial.

A cause de l'odeur répandue par le gibier, la

chambre de conservation a besoin d'être ventilée avec soin. On obtient un bon refroidissement, en



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 71. — Chambre froide pour la conservation de la volaille et du gibier (construction Sulzer).

réalisant une circulation d'air froid et en installant au plafond une tuyauterie réfrigérante.

2. — Conservation des fruits frais. — Les *pommes et les poires* peuvent être conservées durant plusieurs mois à une température comprise entre

+ 2° et + 4° C., l'état hygrométrique s'élevant à environ 78 p. 100. Le succès n'est assuré qu'avec des fruits ayant une maturité convenable au moment de l'introduction au frigorifique ; des fruits, cueillis dans un état plus ou moins vert,



Fig. 72. — Mode d'emballage de pommes conservées au frigorifique.

restent verts, durs et finissent par devenir coriaces ; des fruits trop mûrs ne peuvent être conservés que peu de temps sans devenir farineux et sans se pourrir. Les fruits doivent être refroidis le plus rapidement possible après la cueillette ; un retard de quelques jours peut causer des dommages. Les fruits soumis à l'action du froid doivent être parfaitement sains et intacts ; toute

meurtrissure a pour effet de hâter la putréfaction.

Il est bon que l'emballage soit fait de telle façon que les fruits ne se touchent pas (fig. 72). Lorsque la conservation ne doit pas dépasser trois ou quatre mois, on obtient de bons résultats avec les pommes et les poires, en les emballant dans



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 73. — Chambre froide pour la conservation des fruits en caisse.

de la fine paille de bois, de manière à les isoler les unes des autres et à ne former qu'une seule couche par caisse. Si l'on veut conserver pendant une période plus longue (par exemple durant six ou sept mois) des pommes et des poires fines [1]

1. Espèces de poires : Louise-Bonne d'Avranches, William Duchesse, Beurré Clairgeau, Duchesse d'Angoulême, Beurré de Mérode, etc...

Espèces de pommes : Pomme de cœur, Ananas rainette, Rainette dorée, Bismarck, Présent d'Angleterre, Bellefleur de Gueldre, Reine Emma, etc...

emballées dans des paniers ou dans des caisses (fig. 73) à plusieurs couches superposées, il est nécessaire d'entourer chaque fruit d'une double enveloppe de papier, d'abord papier doux et filamenteux (papier de journal non imprimé), puis papier paraffiné. La première enveloppe sert à absorber les parties aqueuses qui se dégagent du fruit ; la deuxième enveloppe empêche l'humidité de l'air de se condenser à la surface du fruit. On constate que, grâce à ces enveloppes, une poire même pourrie ne cause aucun dommage aux fruits avoisinants et enveloppés aussi, tandis qu'elle les gâte lorsqu'ils ne sont pas enveloppés les uns et les autres.



Fig. 74. — Conservation frigorifique du raisin.

La *Reine-Claude* peut être conservée pendant six semaines à une température de + 1° C. et avec un état hygrométrique égal à 75 p. 100.

Les *cerises* peuvent être conservées de trois à cinq semaines ; les *pêches*, de vingt jours à trois semaines.

Le *raisin* est cueilli en grappes à longs bois, dont les extrémités sont plongées dans de petits flacons remplis d'eau et rangés sur une sorte de porte-vaisselle en bois (fig. 74). Dans ces conditions, à une température de + 2° C. et avec un titre d'humidité égal à 90 p. 100, on peut conserver du *Black-Alicante* durant trois à quatre mois, comme on l'a constaté à l'entrepôt frigorifique *Vriesseveem* à Amsterdam.

3. — **Conservation des fruits secs et des fruits stérilisés par la vapeur.** — On peut également conserver par le froid les *fruits secs* et les *fruits stérilisés par la vapeur*, tels que pommes, poires, raisins, etc. Le but est d'empêcher les fruits de se réduire en sirop; de prévenir le développement des insectes, tels que les mites; d'empêcher la perte de volume par suite de l'évaporation des parties liquides sous l'influence de l'élévation de température. Il faut pour la conservation que les chambres froides soient soigneusement ventilées, et que la température y soit maintenue entre — 2° et + 2° C.

4. — **Conservation des légumes frais.** — Les *légumes frais* peuvent également être conservés dans les chambres froides.

Les *choux de Bruxelles*, maintenus à une température égale à — 1° C. environ peuvent être conservés trois semaines emballés dans des sacs d'une capacité de 10 kilogrammes environ. Leur conservation à cette température peut être portée à six semaines en les étendant sur des

grils de bois, qui permettent de les exposer de toutes parts à l'action de l'air froid.

Les *endives*, étendues sur un porte-vaisselle en bois, peuvent être maintenues durant trois semaines dans un parfait état de fraîcheur, à la condition de maintenir la température de la chambre froide aux environs de + 1° C.



Fig. 75. — Fleurs coupées conservées durant quarante-cinq jours dans le laboratoire frigorifique de la Société du Froid Industriel à Paris.

Le *persil et le céleri* peuvent être conservés durant deux mois à la température de + 1° C.

Les *asperges* sont susceptibles d'être conservées en très bon état à une température de + 4° C. durant trois semaines.

5. — Conservation des oignons à fleurs et des fleurs coupées. — Les *oignons à fleurs* sont conservés par le froid dans le but de retarder leur développement jusqu'à l'époque où les cultivateurs ont besoin de ces fleurs, pour faire fleurir plus tard dans des serres, à l'aide de la chaleur forcée (fig. 75),



Fig. 76. — Fleurs coupées conservées durant cinquante jours dans le laboratoire frigorifique de la Société du Froid Industriel à Paris.

les oignons qui ont été tenus en repos pendant tout ce temps. Les *oignons de lis* donnent de bons résultats avec une température égale à — 1° C. et un état hygrométrique égal à 80 ou 85 p. 100. Les *muguets ou convallaires* se conservent à une température de — 2° C. Les spiréas et les oignons à fleurs de Hollande donnent de bons résultats à une température de 0°,5 à + 1° C. et avec un titre d'humidité égal à 80 ou 85 p. 100.

Les *fleurs coupées* peuvent elles-mêmes être conservées dans des chambres froides à la température de — 2° C. (fig. 76, 77, 78).



Fig. 77. — Muguets conservés par le froid.

6. — Conservation du beurre. — Le froid joue un rôle important en laiterie pour la conservation du *beurre* (fig. 79). Les

causes d'altération du beurre sont de trois sortes :



Fig. 78. — Muguets retardés par le froid, puis replantés.



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 79. — Chambre froide d'une halle (beurre et œufs).

1° Des phénomènes physiques modifiant le beurre en agissant, soit sur la matière grasse,

soit sur les autres constituants (eau, sucre de lait, caséine, etc.) ;

2° Des phénomènes chimiques d'oxydation ;

3° Des processus de décomposition d'origine microbienne.

Si on veut suspendre momentanément l'action des bactéries tout en ne modifiant pas les propriétés physiques du beurre, on peut employer les températures de 0° à + 4° C., qui permettent la conservation pendant cinq à six mois des beurres de crèmes centrifuges bien fabriqués et mis rapidement en chambre froide. Il ne peut s'agir ici de beurres fermiers, dont la conservation est en général des plus aléatoires.

Les beurres conservés en chambre froide et plus particulièrement les beurres conservés audessous de zéro, présentent, après quelque temps, des marbrures dont le nombre et l'étendue paraissent en raison inverse de la perfection de la pâte.

Le retour des beurres réfrigérés à la température normale doit s'effectuer lentement, afin d'éviter des modifications dans la structure de la pâte. En général, il est avantageux de faire subir à ces beurres un dernier malaxage avant la vente [1].

L'humidité et l'obscurité favorisent beaucoup le développement des moisissures. Il peut arriver que la surface des mottes de beurre se recouvre en frigorifique de colorations variées, vertes,

1. P. Dornic et P. Daire, *De la conservation du beurre*. (Industrie frigorifique, 5e année, n° 54, novembre 1907).

P. Daire. *Conservation du beurre par le froid*. (Industrie frigorifique, 10e année, n° 112, septembre 1912).

jaunes, noires ou rouges. Il importe de ventiler fortement les chambres au moyen d'air refroidi par son passage au travers d'une solution incongelable. Il est bon de renouveler complètement plusieurs fois par jour l'air des locaux froids avec de l'air extérieur refroidi, qui a d'abord été filtré par son passage au travers d'une solution antiseptique.

Enfin, de temps en temps s'impose la désinfection des locaux par le formol en lavage des parois et vaporisations prolongées.

Le beurre doit être entreposé sous forme de pains cubiques assez volumineux (50 kg. environ), afin de réduire la surface en contact avec l'air. Ces pains doivent être entourés de calicot bien propre, au-dessus duquel on met du papier sulfurisé exempt de traces de moisissure. Il est avantageux de conserver le beurre dans des pots de grés vernissés hermétiquement clos.

En résumé, la conservation du beurre par le froid ne peut s'appliquer qu'aux beurres préparés dans les conditions suivantes :

Fabrication centrifuge avec acidification normale des crèmes au degré voulu ; — délaitage très soigné alors que le volume des grains de beurre ne dépasse pas celui d'un grain de mil ; — teneur en eau ne dépassant pas 14 p. 100 ; — mise en frigorifique aussitôt après la fabrication.

En aucun cas, il ne faut tenter de conserver par le froid un beurre préparé dans de mauvaises conditions ou présentant des traces de rancissure ou d'altération quelconque.

7. — Conservation des œufs par le froid seul. — L'*œuf* est une denrée très difficile à conserver. Il est en effet très sensible aux influences extérieures ; par exemple des odeurs fortes contenues dans l'air des chambres sont capables d'exercer une influence nuisible et de gâter le produit. Si l'on veut conserver avec succès des œufs dans les chambres froides, il faut que les conditions générales de conservation énoncées dans l'Introduction soient réalisées d'une manière plus stricte que pour toute autre denrée.

Rappelons que ces conditions sont :

a) La température et le titre d'humidité de l'air, qui doivent être aussi constants que possible ;

b) La ventilation ou renouvellement de l'air qui doit se faire à des époques fixes ;

c) Le réchauffement des œufs à la sortie des chambres froides, de manière à leur donner peu à peu la température de l'air extérieur ;

d) Le mode d'emballage et la nature des matériaux servant à cet emballage.

La température des chambres froides doit être maintenue le plus possible à + 2 ou + 3° C. Le titre d'humidité de l'air doit rester compris entre 75 et 80 p. 100. Dans ces conditions l'évaporation des liquides de l'œuf est empêchée, et le contenu est maintenu intact ; l'albumine de l'œuf devenant plus consistante, le jaune ne surnage pas et n'entre pas en contact avec la coque. On sait que, à partir du moment où ce contact a lieu, l'œuf commence à se gâter.

Le renouvellement de l'air des chambres froides

doit se faire à intervalles réguliers en prenant soin de donner à l'air pur, qui est envoyé par les ventilateurs, la température et le titre d'humidité indiqués plus haut.

Le réchauffement progressif des œufs à leur sortie des chambres empêche la formation d'une couche d'humidité sur les matériaux d'emballage, humidité capable de gâter les œufs pendant le transport.

Les matériaux servant à l'emballage se composent généralement de paille de bois inodore et sèche. L'emballage se fait dans des caisses en bois garnies de toutes parts d'ouvertures d'environ 0^{m},015 de largeur pour faciliter la circulation de l'air froid ; les œufs sont disposés en différentes couches, noyés à de petites distances les uns des autres dans la paille, afin de ne pas se toucher.

Dans l'entrepôt frigorifique de la *Société Anonyme des Frigorifiques de Bordeaux*, on place les œufs séparés dans des alvéoles sur des étagères ; on peut alors facilement retourner chaque œuf environ deux fois par semaine, ce qui est nécessaire pour éviter que le jaune vienne adhérer à la coquille.

Quand toutes ces conditions sont réalisées, on peut compter sur une conservation de cinq à six mois. L'œuf ainsi conservé peut être mangé à la coque au bout de trois ou quatre mois ; mais à partir du quatrième mois, l'évaporation élargit la chambre à air de la coquille ; dès lors son utilisation est plus indiquée pour d'autres usages culinaires et pour la pâtisserie.

8. — Conservation des œufs. Procédé Lescardé. — M. *Lescardé*[1] préconise pour les œufs un procédé de conservation qui permet de manger les œufs à la coque, même après dix mois de conservation, l'albumine conservant la belle couleur blanchâtre que l'on remarque dans les œufs fraîchement pondus. Cet ingénieur place d'abord les œufs dans un milieu gazeux composé d'anhydride carbonique et d'azote, sans oxygène; les proportions respectives de ces deux gaz, à l'extérieur comme à l'intérieur des œufs, sont celles que l'on rencontre dans l'albumine des œufs lorsqu'ils sont fraîchement pondus.

Les œufs ainsi traités et placés dans des caisses métalliques hermétiquement fermées sont conservés dans les chambres froides à une température comprise entre 0° C et + 2° C.

Cette conservation en vase clos dans un milieu gazeux antiseptique présente divers avantages. Il n'y a plus d'évaporation à la surface des œufs, qui conservent leur plein. Les œufs peuvent attendre un certain temps à leur sortie des chambres froides avant d'être consommés, ce qui n'a pas toujours lieu avec la conservation ordinaire par le froid seul. On n'a plus à s'inquiéter de la ventilation des chambres froides et du degré hygrométrique de leur air. Enfin, le réchauffement progressif des œufs à leur sortie des chambres froides et avant leur emballage en vue de l'expédition, se fait à l'intérieur même des caisses.

1. Lescardé. *L'œuf de poule; sa conservation par le froid* (Paris, H. Dunod et E. Pinat, éditeurs).

M. Lescardé évalue à 2 francs par mille la dépense supplémentaire occasionnée par le traitement en question. Il est vrai que ce procédé de conservation ne peut être appliqué qu'en grand et nécessite des dépenses élevées de premier établissement.

§ 2. — Les entrepôts frigorifiques dans les divers pays.

1. — Les entrepôts frigorifiques aux États-Unis. — En 1908, on comptait aux Etats-Unis plus de 1.000 entrepôts frigorifiques pour toutes denrées, dont plus de 200 avaient chacun des chambres froides d'une capacité totale de 3.000 mètres cubes environ ; la capacité totale des chambres froides de tous ces frigorifiques était alors de 5 millions de mètres cubes. Quelques-uns de ces entrepôts actuellement existants sont immenses et disposent d'un volume de 56.000 mètres cubes de chambres froides ; il y a un entrepôt à New-York de 225.000 mètres cubes, un à Boston de 200.000 mètres cubes.

2. — Les entrepôts frigorifiques en Angleterre. — En Europe, c'est l'Angleterre qui tient le premier rang au point de vue du nombre et de la capacité des entrepôts frigorifiques. Ces entrepôts sont surtout nombreux à Londres et à Liverpool. Citons-en quelques-uns des plus importants.

Les *Surrey Commercial Docks Cold Stores* à Londres possèdent des chambres à — 10° C. dont la capacité est égale à 7.400 mètres cubes ;

des chambres à + 4° C. dont la capacité est égale à 15.400 mètres cubes ; enfin, des chambres à + 10° environ dont la capacité est égale à 29.000 mètres cubes. Les principales denrées conservées sont de la viande, du fromage, du beurre, du porc et des produits de laiterie.

A Liverpool, les *Imperial Cold Stores* ont une capacité de 11.000 mètres cubes.

A Hull, le grand port d'importation du beurre, des œufs et de la volaille, la *Union Cold Storage C°*, a des magasins frigorifiques d'une capacité de près de 17.000 mètres cubes.

A Southampton, la *International Cold Storage and Ice C^y^ L^d^* possède l'entrepôt frigorifique le plus important de l'Europe. Il est en ciment armé du système Hennebique, avec une capacité de 56.500 mètres cubes. Il contient 61 chambres séparées maintenues à des températures convenables ; parmi celles-ci il y en a d'installées pour contenir 10.000 quartiers de bœuf réfrigéré ; d'autres renferment des denrées de toutes sortes réfrigérées et congelées. La réfrigération est obtenue au moyen de machines à ammoniaque. L'entrepôt est relié d'un côté à des voies ferrées qui permettent à des wagons de pénétrer à son intérieur. De l'autre côté, des navires peuvent accoster à quai le long de l'établissement (9^{m},80 d'eau aux basses mers). Une sorte de tapis roulant permet le déchargement facile des navires.

3. — Entrepôts frigorifiques en Allemagne. — Les entrepôts frigorifiques pour toutes denrées ne sont pas très nombreux en Allemagne. Les frigori-

fiques d'abattoirs, dont nous parlerons dans un prochain chapitre, contiennent parfois des chambres à œufs (frigorifique de l'abattoir de Cologne). Il convient toutefois de signaler, à titre d'exemple, le frigorifique installé par la Société *Humboldt* dans les sous-sols du *principal marché de Cologne*. Ce frigorifique comprend 6 chambres de conservation ; une pour les œufs, une pour la viande, deux pour la volaille et le gibier, une pour le poisson et une pour le fromage. L'isolement des chambres est fait avec des briques de liège imprégnées de brai inodore. Les chambres à œufs et à viande sont refroidies au moyen d'un courant d'air froid (frigorifères secs placés en dehors des chambres) ; la chambre de conservation des fromages est refroidie au moyen de tuyaux à ailettes pendus au plafond (détente directe de l'ammoniaque) ; enfin, les chambres dans lesquelles on conserve à l'état de congélation la volaille et le gibier sont refroidies à la fois par circulation d'air froid (frigorifères secs placés en dehors des chambres) et par tuyaux suspendus au plafond (détente directe de l'ammoniaque).

Les compresseurs frigorifiques, au nombre de deux, ont chacun une puissance de 120.000 frigories-heure ; ils sont commandés par une machine à vapeur horizontale monocylindrique ; un compresseur à grande vitesse actionné par une machine compound verticale peut servir de machine de secours. En été, la vapeur d'échappement de ces machines est employée pour faire de la glace-cristal ; le générateur à glace a une puissance horaire de 300 kilogrammes. La vapeur nécessaire

pour actionner ces machines (ainsi que celle qui est nécessaire pour l'éclairage) est fournie par trois chaudières tubulaires ayant chacune 100 mètres carrés de surface de chauffe.

4. — **Entrepôt frigorifique de la Société Anonyme dite** ***Vriesseveem*** **à Amsterdam.** — La Société Anonyme *Vriesseveem* a fondé à Amsterdam un entrepôt frigorifique, caractérisé par ce fait qu'il existe non seulement des chambres pour la viande, le gibier et la volaille, le beurre et les œufs, le poisson, les fruits et légumes de toutes natures; mais encore des chambres de conservation pour les *oignons à fleurs*, dont le froid artificiel retarde le développement jusqu'à l'époque où les cultivateurs ont besoin de ces fleurs, pour faire fleurir dans des serres les oignons qui ont été maintenus en repos durant ce temps. Le froid est produit par trois machines frigorifiques d'une puissance de 140.000 frigories-heure. Le volume des chambres est égal à environ 5.000 mètres cubes.

5. — **Les entrepôts frigorifiques en Italie.** — C'est la Lombardie qui possède les entrepôts frigorifiques les plus nombreux et les plus importants. A Milan en particulier, existent trois grands entrepôts. Celui de la *Società anonima ghiaccio artificiale* comprend 6 compresseurs à ammoniaque d'une puissance totale de 770.000 frigories-heure; l'espace réfrigéré est égal à 5.650 mètres cubes, dont 2.835 sont affectés à la conservation des matières alimentaires et 2.815 à des glacières.

L'entrepôt créé en 1898 par la *Società dei magazzini refrigeranti e del ghiacco artificiale Gondrand Mangili* est le plus important de l'Italie pour la capacité des locaux réfrigérés et la puissance des appareils mécaniques. Le froid est produit par six compresseurs à ammoniaque du type Linde, ayant une puissance totale de 830.000 frigories-heure ; les locaux réfrigérés ont, y compris les glacières contenant 6.000 tonnes de glace environ, un cubage total de 15.400 mètres cubes ; en particulier, le dépôt destiné aux œufs est assez vaste pour en contenir jusqu'à 9 millions, disposés dans des caisses en bois à claire-voie. Enfin, il existe encore à Milan une troisième installation qui appartient à la maison *Ferrario, Ferrandi, Canevaghi et C°;* elle comprend en réalité deux entrepôts situés en des endroits différents de la ville, dans lesquels la capacité totale des locaux réfrigérés est égale à 1.500 mètres cubes, dont 930 mètres cubes sont subdivisés en caves pour les bouchers et les charcutiers ; le froid est produit par trois compresseurs à ammoniaque dont la puissance totale est égale à 240.000 frigories-heure.

6. — **Les entrepôts frigorifiques en France**. — On compte actuellement en France 80 entrepôts frigorifiques d'importances diverses, mais 15 au plus sont construits suivant les règles qui conviennent aux installations modernes. Parmi ceux-ci citons comme le mieux compris le *Frigorifique des Halles Centrales* établi à Paris sous la Bourse du Commerce. Il convient d'y ajouter les

établissements de la *Société des Frigorifiques de Bordeaux*, de la *Société Frigorifique de Lyon*, les entrepôts d'Epinay et de Marseille installés par la *Société des Entrepôts généraux frigorifiques de la banlieue de Paris et de province*.

Le *Frigorifique des Halles Centrales de Paris* comprend deux étages de chambres froides. Chacun de ces étages comporte 1.200 mètres carrés de locaux refroidis, soit une superficie totale de 2.400 mètres carrés avec un cube utile de 4.800 mètres cubes, la hauteur disponible étant de 2 mètres par étage. Les couloirs donnant accès aux chambres froides occupent environ 130 mètres carrés par étage. A l'étage inférieur, on a établi notamment deux grandes salles de chacune 400 mètres carrés de superficie pour la conservation de la viande de boucherie : à l'étage supérieur, on distingue en particulier 3 salles ayant respectivement 210 mètres carrés, 340 mètres carrés et 250 mètres carrés ; elles sont destinées au magasinage des fruits secs, à la conservation de la volaille et du gibier, à la conservation des fromages. A chacun des étages d'autres salles peuvent être utilisées pour la conservation de diverses denrées. L'entrepôt est refroidi par 4 compresseurs à ammoniaque, 3 d'une puissance égale chacun à 80.000 frigories-heure, 1 d'une puissance égale à 170.000 frigories-heure. Ces compresseurs sont commandés par 4 machines à vapeur, alimentées par 4 chaudières Babcock et Wilcox capables chacune de fournir à l'heure 1.200 kilogrammes de vapeur surchauffée à

325 degrés sous une pression de 12 kilogrammes par centimètre carré. Dans le courant de cet ouvrage, nous avons eu plusieurs fois l'occasion de prendre comme exemple cet entrepôt modèle, dirigé avec tant de compétence par M. Malaquin, l'un des pionniers de l'industrie frigorifique en France.

L'*entrepôt frigorifique d'Epinay-sur-Seine* comprend 11 chambres froides d'un volume de 3.000 mètres cubes environ. Ces chambres sont divisées en trois étages : une chambre au sous-sol (66 mètres carrés) ; 8 chambres au rez-de-chaussée dont les superficies sont comprises entre 40 et 97 mètres carrés ; enfin, 2 chambres au premier étage ont l'une 97 mètres carrés, l'autre 34 mètres carrés. Ces chambres sont destinées à la conservation de toutes sortes de denrées périssables et à l'entreposage des fourrures. Le froid est produit par deux compresseurs horizontaux à ammoniaque de chacun 65.000 frigories-heure ; ces compresseurs sont commandés électriquement.

La Société, qui a fait installer l'entrepôt d'Epinay, vient de construire à Marseille, dans les bâtiments de la Compagnie des docks à la Joliette un grand établissement frigorifique, qui fonctionne actuellement avec huit chambres froides d'une capacité utile de 2.000 mètres cubes ; cette installation sera rapidement complétée par la mise en service de 12 nouvelles chambres ayant une capacité utile de 3.000 mètres cubes. D'ailleurs, lorsque tout le bâtiment sera aménagé en chambres frigorifiques, l'entrepôt de Marseille disposera de 30.000 mètres cubes pour l'entrepo-

sage des marchandises périssables. Actuellement le froid est produit par deux compresseurs à ammoniaque, ayant chacun une puissance de 65.000 frigories-heure.



CHAPITRE VII

LA GLACE ARTIFICIELLE

1. — Classification et définition des glaces artificielles. — On désigne sous le nom de *Glace artificielle* la glace obtenue en utilisant les frigories produites par les machines que nous avons décrites dans un précédent chapitre.

On distingue trois sortes de glaces artificielles.

1° La *glace d'eau de source :* elle est faite avec de l'eau de puits, de source, de fontaine ou de l'eau provenant des canalisations de villes, sans précautions spéciales. Cette glace est opaque, d'aspect mat, trouble, blanc ou laiteux ; on lui donne parfois le nom de *glace opaque.*

2° La *glace translucide :* elle est fabriquée avec de l'eau de puits, de source ou de conduite d'eau de ville, que l'on a pris soin d'agiter durant la solidification. Elle est transparente dans toute son épaisseur, à l'exception d'un noyau opaque, qui cependant n'existe pas dans certains modes de préparation ; on désigne parfois cette glace sous le nom de *glace demi-transparente.*

3° La *glace-cristal* ou *glace d'eau distillée,* qui est préparée au moyen d'eau distillée privée

d'air : elle est transparente dans toute son épaisseur. On la connaît aussi sous le nom de *glace transparente.*

Cette dernière sorte de glace est seule stérile ; les deux autres sortes peuvent contenir des bactéries qui ne sont pas tuées par l'action de la température basse.

La glace artificielle est toujours opaque, à moins que l'on n'emploie divers artifices pour la rendre transparente.

2. — Glace opaque et glace transparente. — Un certain nombre de circonstances influent sur l'aspect de la glace au moment de sa formation. Quelques-unes d'entre elles sont *favorables* à la production de la *glace transparente;* d'autres sont *défavorables*. Parmi ces dernières il convient de citer:

a) La *stagnation de l'eau ;*

b) La *rapidité du gel ;*

c) L'*existence de l'air dissous dans l'eau ;*

d) La *présence de sels dissous dans l'eau ou de matières étrangères* mélangées à celle-ci.

Au contraire, l'*agitation de l'eau*, la *lenteur du gel*, l'*absence d'air*, l'*absence de sels*, constituent des circonstances *favorables* à l'obtention de la glace transparente.

Toutefois, pour obtenir de la glace opaque ou de la glace transparente, il n'est pas nécessaire que toutes les circonstances du premier ou du second type se trouvent réunies; il suffit que l'une des circonstances favorables ou défavorables l'emporte sur les autres. La pratique a reconnu

que les deux meilleurs procédés pour obtenir de la *glace transparente* sont :

a) La *congélation lente de l'eau distillée ;*

b) L'*agitation de l'eau durant la solidification.*

La *glace opaque* (fig. 80) contient dans son ensemble toutes les substances qui se trouvaient primitivement dans l'eau qui a servi à la préparer. C'est pourquoi il est prudent de ne jamais employer de telle glace pour l'alimentation, à moins de connaître la composition de l'eau de préparation.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 80. — Pain de glace opaque.

3. — Glace pure fabriquée à partir d'une eau quelconque. — Mais on peut fabriquer de la glace *chimiquement et bactériologiquement pure* en utilisant une *eau quelconque*, comme l'a montré le Dr Bordas[1] l'éminent directeur des laboratoires de chimie du Ministère des Finances. Il suffit de se rendre compte du processus de la solidification de l'eau dans un récipient métallique prismatique entouré de sau-

1. Dr Bordas. *La glace dans l'alimentation.* (Rapport au premier Congrès International du froid, t. III, p. 153).

mure froide, *mouleau*, pour employer le terme usité dans l'industrie de la glace.

Si on examine un bloc de glace au sortir d'un de ces mouleaux, on constate que la glace est transparente sur toutes les faces latérales et jusqu'à une certaine profondeur (fig. 81) ; sa base, son noyau central et sa face supérieure sont opaques. Quand le mouleau rempli d'eau est plongé dans la solution de saumure froide, et aussitôt que la cristallisation commence à se produire à l'intérieur des parois en contact avec le mélange réfrigérant, il y a concentration vers le milieu du récipient des sels en solution et de toutes les impuretés de l'eau. En même temps s'échappent la plupart des gaz dissous, tandis qu'une partie des sels de chaux se précipitent et se déposent à la base du mouleau. Au fur et à mesure de la solidification, le noyau s'enrichissant de plus en plus en sels, il faut une plus grande dépense de frigories pour la solidification. Lorsque celle-ci se produit, le noyau, en se dilatant, déborde au-dessus du mouleau et y forme une protubérance de glace opaque et impure.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 81. — Pain de glace transparente avec noyau opaque.

L'analyse chimique et bactériologique démontre que toutes les matières solubles et insolubles contenues dans l'eau initiale sont au cours de la congélation refoulées vers le centre du noyau, qui prend alors une couleur blanc grisâtre. Les parties latérales et transparentes fournissent pour la fusion une eau bactériologiquement et chimiquement pure.

Si donc on veut obtenir une telle glace dans ces conditions, il suffit d'éliminer avant sa solidification le liquide formant le noyau.

Il est vrai que le public accepte difficilement des blocs non terminés avec partie centrale creuse. Il suffit alors de pomper le liquide du noyau central et de le remplacer soit par de l'eau distillée, soit par de l'eau reconnue particulièrement bonne pour la consommation ; une congélation ultérieure de ce noyau complète alors le bloc de glace.

4. — **Glace en blocs. Mouleaux.** — La glace artificielle est obtenue soit sous forme de *blocs*, soit sous forme de *plaques*. L'obtention de la glace en blocs est la plus fréquente ; nous allons y insister d'abord.

L'eau à congeler est placée dans des *mouleaux* ou récipients métalliques affectant la forme d'une pyramide tronquée (fig. 82 et 82 *bis*). Ces mouleaux sont placés dans un bac contenant de la saumure incongelable refroidie.

Les mouleaux les plus employés donnent des blocs de glace de 14 à 25 kilogrammes. Cependant dans les grandes fabriques de glace, on emploie

le plus souvent des mouleaux fournissant des blocs d'un poids net de 40 ou 50 kilogrammes.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 82. — Mouleau à fabriquer de la glace en pains de 15 kilogr.



Cliché de la Société du Froid Industriel à Paris.

Fig. 82 *bis*. — Mouleau à fabriquer de la glace en pains de 50 kilogr.

5. — Durée de la congélation de l'eau dans les mouleaux. — La durée de la congélation de l'eau contenue dans ces mouleaux dépend :

1° De la température à laquelle est porté le bain incongelable dans lequel ils sont plongés ;

2° Du rapport qui existe entre la surface du mouleau exposée au refroidissement et son volume ;

3° De l'agitation de l'eau contenue dans le mouleau.

Dans les conditions normales, la température du bain incongelable est comprise entre — 5° C

et — 10° C ; la première température est plus favorable que la seconde à la production de la glace transparente. Le rapport entre la surface exposée au refroidissement (mètres carrés, par exemple) et le volume des blocs (mètres cubes), est compris entre 29 et 35. On concilie ainsi les intérêts du fabricant et du consommateur. Celui-ci désire des blocs de glace épais, qui perdent proportionnellement moins que les blocs minces par la fonte durant le transport ou le magasinage. Le fabricant de glace au contraire a intérêt à produire des blocs minces et plats qui, rapidement congelés et remplacés par du nouveau liquide, ne permettent pas un trop grand abaissement de la température du bain incongelable, ne réduisent pas la production spécifique de la machine frigorifique et, par suite, sont d'un prix moindre.

6. — **Bac à glace.** — Les mouleaux sont plongés dans de la saumure refroidie, qui est contenue dans une cuve étanche de tôle, de ciment armé, ou de bois, que l'on nomme le *bac à glace*.

Ce bac est soigneusement isolé au moyen de substances mauvaises conductrices de la chaleur ; telles que, matelas d'air entre parois de bois, briques ou plaques de liège, laine minérale, etc.

La saumure incongelable est refroidie par le serpentin du réfrigérant d'une machine frigorifique. Celui-ci est généralement disposé au fond du bac dans un double fond. Aussi afin d'égaliser les températures des divers points de la saumure, est-on obligé d'employer un agitateur consistant



Fig. 83. — Bac générateur de glace. Dans le fond, on voit sortir une rangée de mouleaux ; et plus loin, l'appareil de remplissage des mouleaux.



Fig. 84. — Fabrique de glace. Rangée de mouleaux congelés sortant du bain du liquide incongelable.

en une petite turbine ou une petite hélice placée à l'une des extrémités du bac.

L'obtention de la glace translucide nécessite une agitation de l'eau contenue dans les mouleaux. Cette agitation est réalisée au moyen de



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 85. — Bac de démoulage avec appareil pour le basculage des mouleaux (construction Sulzer).

baguettes verticales, plongées dans les mouleaux, et qui sont animées d'un mouvement de va et vient. Lorsqu'il ne reste plus que le quart du contenu du mouleau à congeler, on retire la lame d'agitation, pour l'empêcher d'être prise dans le bloc de glace. C'est à ce moment que l'on peut

vidanger le contenu du noyau et le remplacer par de l'eau distillée ou de l'eau de source préalablement filtrée.



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 86. — Basculage des mouleaux après passage au bac de démoulage.

7. — **Démoulage.** — Les mouleaux sont disposés dans le bac à glace par rangées, les mouleaux d'une même rangée étant reliés à un même châssis (fig. 83 et 84). Lorsque la glace est formée dans tous les mouleaux d'une même rangée, un pont roulant vient saisir, au moyen de chaînes verticales, les crochets du châssis porte-mouleaux. Les mouleaux sont sortis du bac à glace et amenés

au *bac de démoulage* (fig. 85). Celui-ci contient de l'eau chaude, qui, fondant légèrement les blocs de glace, permet de les faire sortir des mouleaux par basculage de ceux-ci (fig. 86, 87, 88).



Fig. 87. — Fabrique de glace. La rangée de mouleaux vient d'être culbutée, les pains de glace sortent des mouleaux et glissent sur le plan incliné.

Après cette opération, la rangée des mouleaux est relevée, amenée sous les appareils de remplissage (fig. 89, 90), enfin replongée dans la saumure.

8. — **Exemple de bac à glace.** — Prenons comme exemple un bac à glace capable de produire par vingt-quatre heures 40 tonnes de glace translucide au moyen de mouleaux donnant des blocs de 40 kilogrammes. Un tel bac peut avoir comme dimensions : 35^{m},40 (longueur), 3^{m},80 (largeur), 1^{m},70

(hauteur) ; il possède un double fond dans lequel est logé l'évaporateur d'une machine frigorifique.



Cliché de la Société française d'Installations frigorifiques à Paris.

Fig. 88. — Fabrique de glace. Vues du pont roulant servant à la manutention des rames de mouleaux de l'appareil de remplissage des mouleaux; du plan incliné sur lequel ont glissé les pains de glace.

Il contient 96 rangées de 16 mouleaux, soit 1.536 mouleaux donnant 1.536 × 40 = 61.440 ki-

logrammes de glace. Avec une température du bain incongelable égale à — 7° C., il faut environ



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 89. — Appareil de remplissage des mouleaux (construction Sulzer).



Fig. 90. — Fabrique de glace. La rame de mouleaux remplis d'eau douce est replongée dans le bac à glace.

trente-deux heures pour congeler complètemen le contenu d'un mouleau.

9. — **Glace en plaques**. — Au lieu d'utiliser un bac contenant de la saumure refroidie, dans laquelle sont plongés des mouleaux contenant l'eau à congeler, on peut remplir le bac avec de l'eau et noyer dans celle-ci des cloisons creuses à l'intérieur desquelles circule un liquide froid, saumure refroidie ou agent frigorifique d'une machine. L'eau du bac se congèle.

Suivant la forme des cloisons dans lesquelles circule le véhicule du froid, on obtient de la glace en *blocs* ou de la glace en *plaques*.

Les cuves sont munies d'un double fond sur lequel reposent les cloisons séparatrices, chaque compartiment communiquant avec le double fond au moyen de trous percés à cet effet. De cette façon les impuretés s'accumulent dans le double fond. L'agitation se fait au moyen de palettes actionnées mécaniquement. Dans le dispositif adopté par la *Compagnie Parisienne de glace transparente* (*Maison Evans, Sandras et C°*), les agitateurs sont des palettes de bois qui se meuvent continuellement de bas en haut dans un espace latéral ménagé dans la cuve et séparé des cloisons réfrigérantes au moyen d'une cloison étanche; cet espace communique avec le double fond, de façon que l'agitation de la palette remue toute la masse du liquide. La disposition de cette palette permet de la faire fonctionner jusqu'à la congélation complète de la cuve. Ces blocs ainsi fabriqués sont alors transparents.

Dans la fabrication américaine de la glace en plaques, la distance de deux cloisons parallèles

est légèrement supérieure à l'épaisseur maximum des plaques, de telle sorte qu'il reste au centre un espace vide dans lequel s'accumulent les impuretés.

Lorsque les plaques sont formées, on les démoule en faisant passer dans les cloisons soit de la saumure chaude (circulation de saumure), soit du liquide frigorifique à la température du condenseur (cloisons en relation avec le condenseur). Les plaques sont encore enlevées au moyen de chaînes ou de crochets spéciaux préalablement immergés dans la masse. On les débite alors au moyen de scies.

On produit ainsi des plaques de glace qui ont $4^{m},80$ de longueur ; $2^{m},40$ de hauteur; $0^{m},35$ d'épaisseur; leur poids est égal à 3 tonnes. Avec une température de bain incongelable comprise entre — 10° C. et — 15° C., la durée de la solidification de ces plaques exige dix jours environ.

10. — Glacières ou réserves de glace. — Les fabriques de glace possèdent le plus souvent des glacières ou réserves de glace. Les glacières doivent, autant que possible, être placées sous terre dans des caves spécialement construites à cet effet. Le bac à glace étant au rez-de-chaussée, la glace est descendue directement au moyen de monte-charges.

Les glacières doivent être disposées pour être *ventilées*, afin d'empêcher les moisissures de se déposer sur la glace. Elles doivent être refroidies au moyen de tuyaux de circulation de saumure ou de tuyaux à détente directe du fluide frigori-

gène. La température à laquelle on maintient les glacières est comprise entre — 5° C. et — 9° C. La glace artificielle entreposée dans des glacières non refroidies se pique ; elle se couvre à la surface d'une multitude de petits trous, qui sont les orifices par lesquels se sont dégagées les bulles d'air emprisonnées durant la congélation. Cette glace piquée n'a pas un bel aspect ; elle est poreuse et peut absorber plus facilement que la glace compacte les germes microbiens de l'atmosphère.

11. — Frigories nécessaires à la production de la glace. — Le nombre des frigories nécessaires à la production de la glace peut se décomposer comme il suit :

1° Refroidissement à 0° de l'eau destinée à la congélation : production de 1 frigorie par kilogramme et par degré ;

2° Congélation de l'eau : 80 frigories par kilogramme ;

3° Refroidissement de la glace à la température moyenne du mouleau, soit environ — 5° C. : $0,5 \times 5$ frigories par kilogramme ;

4° Déperdition de froid. Elle a diverses causes :

a) Refroidissement des mouleaux et châssis de la température initiale de l'eau à congeler à la température du bain : poids des mouleaux $\times$ 0,12 $\times$ abaissement de température ;

b) Rayonnement du bac à glace, soit par les parois latérales, soit par la face supérieure quand on le découvre pour enlever les mouleaux ; de

10 à 15 p. 100 des frigories nécessaires au refroidissement de l'eau et à sa congélation ;

c) Déperdition de froid au démoulage : 3 à 5 p. 100 des frigories nécessaires au refroidissement et à la congélation pour des mouleaux de 25 kilogrammes, 5 à 7 p. 100 pour des mouleaux de 12 kilogrammes.

En prenant de l'eau à + 15° C. on peut évaluer de la manière suivante la dépense de froid par kilogramme, quand on produit des mouleaux de 25 kilogrammes.

		Frig. par kilogr. de glace.
Refroidissement et congélation de l'eau . .		**98**
Poids des mouleaux et châssis.	0,8	
Refroidissement des mouleaux. . . .	0,8	
× 0,12 × 21 = ...		**2**
Rayonnement du bac à glace.	98×0,10=	**10**
Déperdition au démoulage . .	98×0,05=	**5**
		115

En chiffres ronds, on compte en moyenne 120 à 140 frigories pour la production de 1 kilogramme de glace.

12. — Glace d'eau distillée. Production de l'eau distillée. — La fabrication précédente permet d'obtenir de la glace pure en séparant la partie transparente de la partie opaque des blocs. On obtient encore de la glace stérile et transparente en congelant de l'eau distillée.

Cette eau distillée peut être :

a) L'eau de condensation de la vapeur produite directement par une chaudière ;

b) L'eau de condensation de la machine à vapeur actionnant le compresseur frigorifique.

On peut définir de la manière suivante les divers schémas de production de cette eau distillée.

1° La vapeur produite par la chaudière alimentant la machine à vapeur (vapeur primaire) est utilisée directement pour produire de la vapeur (vapeur secondaire) dans une chaudière spéciale. L'eau de condensation de la vapeur primaire et l'eau de condensation de la vapeur secondaire servent séparément au remplissage des mouleaux. La glace produite avec l'eau de condensation de la vapeur secondaire est employée pour la consommation. La glace produite avec l'eau de condensation de la vapeur primaire est utilisée pour refroidir des locaux ou des denrées, sans être mise en contact avec celles-ci.

2° La vapeur d'échappement de la machine motrice vaporise, sous pression réduite, de l'eau dans une chaudière spéciale. La vapeur secondaire ainsi obtenue est condensée sous pression réduite. Cette eau de condensation est amenée dans un bouilleur, dans lequel elle est portée à une température suffisamment élevée pour la stérilisation. Enfin, cette eau refroidie sert pour le remplissage des mouleaux.

Un tel mode de préparation est installé par la Société Linde.

3° L'eau provenant de la condensation de la vapeur d'échappement est mélangée à l'eau produite par la condensation de la vapeur secondaire. Il est alors nécessaire d'éliminer avec soin au

moyen de filtres et d'ébullitions convenables les moindres traces d'huile de graissage capables de donner à l'eau et par suite à la glace une odeur désagréable.

4° La Société Humboldt de Cologne introduit dans les mouleaux un mélange formé de l'eau de condensation de la machine motrice et d'eau primitivement stérilisée par un chauffage à une température supérieure à 100° C. La vapeur d'échappement du moteur passe d'abord au travers d'un séparateur d'huile ; elle est condensée, puis dirigée dans un réservoir, où l'on fait arriver de l'eau portée à une température d'au moins 100° (eau pure chauffée par une partie de la vapeur d'échappement ou eau filtrée venant directement de la chaudière). Le mélange, porté ainsi à une température d'environ 60° à 70° supérieure à celle de l'eau de condensation, est refroidi, passe ensuite dans un filtre, puis vient au réservoir de remplissage des mouleaux.

Il est intéressant de se demander quelle quantité d'eau il faut ajouter à l'eau de condensation de la machine motrice pour alimenter une fabrique de glace.

13. — Glace d'eau distillée. Exemple d'une petite fabrique de glace. — Prenons d'abord comme exemple une petite fabrique produisant 200 kilogrammes à l'heure ou $4^t,8$ par vingt-quatre heures [1].

1. Banfield. *Ueber die Herstellung von Kristalleis aus Abdampf und die damit erreichten praktischen Ergebnisse* (Deuxième Congrès International du froid à Vienne, octobre 1910, p. 114).

Il convient de produire par heure

$$200 \times 120 = \mathbf{24.000} \text{ frigories.}$$

Si on emploie un compresseur produisant à l'heure 3.000 frigories par cheval indiqué ou à la machine à vapeur 3.000 × 0,80 = 2.400 frigories par cheval indiqué, il faudra dépenser pour actionner ce compresseur 10 chevaux-heure indiqués. Si on compte une dépense de 4 chevaux-heure indiqués, pour la commande de la pompe à eau, des agitateurs et pour les transmissions, il faut employer un moteur de 14 chevaux indiqués Prenons une petite machine à tiroir et à condensation consommant 16 kilogrammes de vapeur par cheval-heure indiqué. On voit que cette machine fournira par heure 14 × 16 = 224 kilogrammes d'eau. Une telle machine fournira donc une quantité d'eau suffisante pour alimenter la fabrique de glace.

14. — Glace d'eau distillée. Exemple d'une moyenne fabrique de glace. — Considérons maintenant une fabrique moyenne produisant 750 kilogrammes de glace à l'heure ou 18 tonnes de glace par vingt-quatre heures. La quantité d'eau distillée nécessaire est égale à 790 kilogrammes par heure. Pour produire cette masse de glace, il faut dépenser par heure 90.000 frigories. Si on prend une machine formée d'une machine à vapeur et d'un compresseur produisant 2.700 frigories par cheval-heure indiqué [3.400 frigories par cheval-heure, mesurées au compresseur], on voit que pour actionner le compresseur, il faut dépenser

une puissance de 33 chevaux indiqués. Comptons sur une puissance supplémentaire de 19 chevaux pour la commande des agitateurs de la saumure et de l'eau douce, de la pompe à eau, etc. Nous devrons donc employer une machine à vapeur de 43 chevaux indiqués. En admettant une dépense de 9 kilogrammes de vapeur saturée à 5 atmosphères de pression par cheval-heure indiqué, on voit que la machine produira 387 kilogrammes d'eau par heure pour le remplissage des mouleaux, soit 50 p. 100 de la quantité nécessaire à la fabrique de glace. Employons la vapeur d'échappement à échauffer une chaudière destinée à produire directement de l'eau distillée ; par kilogramme de vapeur primaire, on obtient avec un appareil à double effet environ $1^{kg},05$ de vapeur secondaire, soit 406 kilogrammes d'eau distillée supplémentaire. On obtient ainsi finalement l'eau nécessaire au fonctionnement de l'usine.

15. — Glace d'eau distillée. Exemple d'une grande fabrique de glace. — Enfin, considérons une grande installation produisant 3.500 kilogrammes de glace à l'heure, soit 84 tonnes en vingt-quatre heures. La quantité d'eau nécessaire au fonctionnement de l'usine est égale à 3.780 kilogrammes par heure. La dépense de frigories s'élève à 420.000 par heure.

Si on compte 2.900 frigories par cheval-heure indiqué mesuré à la machine à vapeur (3.600 frigories par cheval-heure indiqué mesuré au compresseur), on voit que le compresseur exige une puissance de 145 chevaux indiqués, auxquels il

convient d'ajouter 30 chevaux environ pour la commande des agitateurs, du pont roulant, des pompes à eau, etc. La machine doit donc produire 175 chevaux indiqués, c'est-à-dire que l'on doit avoir une machine de 250 chevaux marchant aux 3/4 de la puissance. Comptons par cheval-heure sur une dépense de 8 kilogrammes de vapeur saturée à 5 atmosphères.. La vapeur d'échappement fournit alors 1.400 kilogrammes d'eau distillée par heure c'est-à-dire à peine les 39 p. 100 de la quantité d'eau nécessaire. Si, sur le parcours de la vapeur d'échappement, on installe une chaudière de distillation à triple effet, on peut obtenir par kilogramme de vapeur primaire environ, $1^{kg},4$ de vapeur secondaire ; soit, dans le cas actuel 1.960 kilogrammes d'eau distillée. Il manque encore 420 kilogrammes d'eau par heure, que l'on devra emprunter directement à la chaudière. Celle-ci produira donc environ par heure 1.850 kilogrammes de vapeur saturée à 5 atmosphères. Si on alimente la chaudière avec de l'eau à 35° et si on admet 70 p. 100 comme effet utile de l'ensemble formé par la chaudière et la grille, on voit qu'il faut produire dans le foyer $\frac{616}{0,7} = 880$ calories environ par kilogramme de vapeur. En admettant 7.300 calories-kilogrammes pour puissance calorifique du charbon, on voit qu'il faut brûler sur la grille environ 1 kilogramme de charbon pour produire 8 kilogrammes de la vapeur considérée, soit 235 kilogrammes de charbon par heure. En comptant par an sur cinq mille cinq cents heures.

de fonctionnement, la dépense annuelle de charbon s'élèvera à 1.300 tonnes en nombres ronds. Comme durant ce temps on produit 19.250 tonnes de glace, on voit que l'on brûle une tonne de charbon pour produire 15 tonnes de glace.

La dépense en charbon s'élève à 32.500 francs [25 francs la tonne]. Admettons un amortissement annuel de 30.000 francs [250.000 francs, prix de la machinerie ; coefficient d'amortissement = 12 p. 100] pour les machines, et de 4.200 francs pour les bâtiments [60.000 francs, prix des bâtiments ; coefficient d'amortissement = 7 p. 100]. Non compris les dépenses de personnel, la dépense totale par an sera égale à 67.000 francs environ.

16. — La glace artificielle aux États-Unis. — La fabrication de la glace s'est énormément développée aux *Etats-Unis*. En 1908, on comptait dans ce pays 3.300 fabriques de glace[1], produisant environ 100.000 tonnes de glace par jour : dans ce nombre ne sont pas comptées les installations produisant la glace dans les abattoirs, les entrepôts frigorifiques, etc. La consommation de la glace s'élevait par an à 14 millions de tonnes de glace environ, représentant une valeur de 35 millions de dollars, ou de $12^{fr},50$ la tonne. Les capitaux engagés dans les fabriques de glace s'élevaient en 1908 à 100 millions de dollars (500 millions de francs).

1. Van der Vaart. *Growth and present status of the refrigerating industry in the United States.* (Rapport au Congrès International du froid, tenu en octobre 1908, t. III, p. 330).

17. — La glace artificielle en Angleterre. — En *Angleterre*, il existe un très grand nombre de fabriques de glace, qui sont annexées à des entrepôts frigorifiques ; d'autres fabriques produisent uniquement de la glace. Parmi les plus importantes de ces dernières, il faut citer *The New Grimsby Joint Ice Factory Ltd., á Grimsby*, qui produit 300 tonnes de glace par jour ; *North Pole Ice Co. Ltd* à Londres, qui produit 100 tonnes de glace par jour ; *Pure Ice Co Ltd*, à Londres, qui a une capacité de production de 150 tonnes par jour. Cette dernière fabrique a coté la glace au prix de 14^{fr},80 la tonne (avec surtaxe de 6^{fr},25 pour livraison à une distance de 8 kilomètres de la Cité). Ce prix est le plus bas de tout le marché. Le prix de 25 francs à 30 francs la tonne est plus fréquent, et dans la saison chaude on a même vu ce prix monter à 40^{fr},50.

18. — La glace artificielle en Allemagne. — En *Allemagne*, il n'y a qu'un petit nombre d'usines fabriquant uniquement de la glace. La plupart des fabriques de glace sont annexées à des frigorifiques d'abattoirs. Cependant il faut citer la *Deutsch-Belgische Kristall-Eisfabrik*, à Cologne, qui a une capacité de production de 75 tonnes par jour. D'après le rapport établi pour le Congrès international du Froid, tenu à Paris en octobre 1908, on évaluait à cette époque la production annuelle maxima de l'Allemagne à 800.000 tonnes de glace artificielle. Une notice publiée par le *Syndicat des fabricants de*

glace de Berlin et des environs, évalue à 1.500 tonnes le poids de la glace fabriquée journellement à Berlin, soit une production de 270.000 tonnes pour les six mois de l'été. En 1909, le prix moyen de la glace fournie par les abattoirs a été[1] :

	Francs la tonne.
Glace prise à l'usine (en quantités supérieures à 250 kilogrammes).	**15**
Glace livrée à domicile (en grandes quantités)	**22,50**
Glace livrée à domicile (aux particuliers).	**25** à **40**

Les prix de la glace fournie par les usines à glace ont été les suivants :

Glace prise à l'usine (en quantités supérieures à 250 kilogrammes).	**11** à **17,50**
Glace prise à l'usine (en petites quantités)	**17,50** à **30**
Glace livrée à domicile (en grandes quantités)	**15** à **20**
Glace livrée à domicile (en petites quantités)	**17,50** à **30**
Glace livrée à domicile (aux particuliers.	**37,50** à **55**

19. — La glace artificielle en Italie. — En *Italie*[2], la plupart des usines de glace sont annexées à des entrepôts frigorifiques. Il faut citer l'*usine à glace et entrepôt frigorifique de Turin*, dont la capacité de production est égale à

1. Herrmann. *Die Eispreise in Deutschland*, 1909. (Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie, 17e année, fasc. 4, avril 1910).

2. *L'industrie frigorifique en Italie*. (Rapport au premier Congrès International du froid, octobre 1908).

100 tonnes par jour; la *Société anonyme de la glace artificielle à Milan*, qui peut également produire 100 tonnes par jour ; la *Société des magasins frigorifiques et de la glace artificielle Gondrand Mangili à Milan*, qui est capable de produire 110 tonnes de glace en vingt-quatre heures. A Vérone, la *Compagnie générale des eaux pour l'étranger*, dont le siège est à Paris, exploite une grande fabrique de glace alimentaire faite avec de l'eau provenant des conduites de la ville. Deux compresseurs à ammoniaque de chacun 150.000 frigories-heure refroidissent deux bacs à glace dont la production est de 60 tonnes toutes les vingt-quatre heures, en blocs dont chacun a un poids moyen de 34 kilogrammes : les compresseurs sont commandés par une turbine hydraulique de 130 chevaux, tandis qu'une autre turbine de 30 chevaux sert pour le service des congélateurs, pour la production de la lumière électrique, et pour actionner les diverses machines-outils d'une petite usine, servant aux réparations de la machinerie qui fait partie de l'établissement. La production moyenne annuelle est de 7.300 tonnes. Le prix moyen de vente de la glace prise à l'usine et pour des quantités non inférieures à 100 kilogrammes à la fois ne dépasse pas le prix très bas et assez peu rémunérateur de 10 francs la tonne. A Rome, une grande fabrique de glace (capacité journalière de 110 tonnes) est annexée à une brasserie ; le prix moyen de la glace est de 17 francs la tonne, pour des quantités supérieures à 100 kilogrammes. A Naples, une fabrique de glace, dont la produc-

tion annuelle ne dépasse pas 5.000 tonnes, transforme la glace en neige, afin de correspondre aux habitudes du public napolitain et aux exigences des nombreux pâtissiers et glaciers locaux : la glace est d'abord réduite en très petits morceaux au moyen de rouleaux garnis de dents métalliques, disposés en hélices ; cette sorte de neige est ensuite comprimée et réduite sous forme de cubes. Le prix très élevé de la glace s'élève jusqu'à 80 francs la tonne. A Bari, une usine à glace de 30 tonnes par jour prépare de la glace d'eau distillée au moyen d'une puissante chaudière de distillation pouvant donner 1.500 kilogrammes d'eau distillée à l'heure ; le prix de cette glace est de 27fr,50 prise à l'usine.

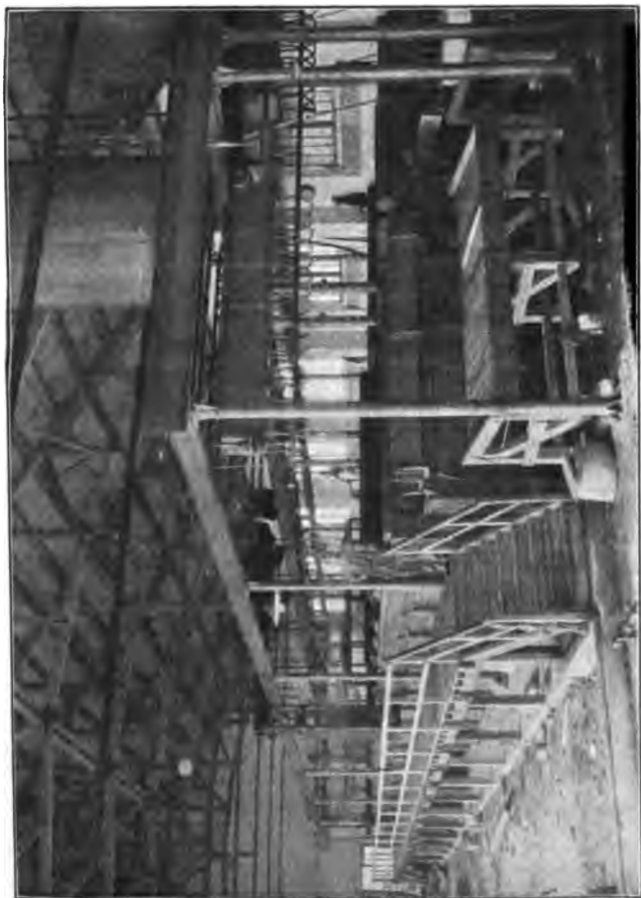
20. — La glace artificielle à Buenos-Aires. — La capitale de la République Argentine, *Buenos-Aires*, est peut-être la ville du monde qui présente la plus grande production de glace par tête d'habitant [1]. Elle possédait en 1908 16 usines à glace, d'un rendement total de 738 tonnes par vingt-quatre heures, soit par jour 650 grammes de glace par habitant. Toute la glace produite par ces établissements est obtenue au moyen d'eau distillée. A la *Negra Maschwitz Rey Limitada*, on emploie un appareil à quintuple effet, chauffé pour le premier effet, par la vapeur d'échappement ; le premier de ces quatre effets travaille dans le vide, le dernier à 740 milli-

1. *La République Argentine au Premier Congrès International du froid.* Rapport de M. J. S. Rey-Basadre.

mètres. Cet appareil fournit 160 tonnes d'eau pour la fabrication de la glace[1]. Le prix de gros de la glace à Buenos-Aires est 50 francs la tonne, celui-ci du charbon étant 55 francs la tonne. Buenos-Aires possède la première place au point de vue du bas prix de la glace artificielle et chimiquement pure par rapport au prix du charbon ; en effet, nulle part on ne vend la glace artificielle à un prix inférieur à celui du charbon brûlé pour la produire.

21. — La glace artificielle en France. — A la fin de 1910, il existait en France et dans les colonies françaises 420 fabriques de glace pour les usages domestiques, l'approvisionnement des bateaux de pêche, etc... La production du plus grand nombre d'entre elles ne dépasse pas 100 kilogrammes à l'heure. Cependant la *Société des Glacières de Boulogne-sur-Seine* a une installation frigorifique à ammoniaque d'une puissance de 240.000 frigories-heure ; la *Société anonyme des Glacières de Paris* possède 5 machines à ammoniaque du type Linde ayant ensemble une puissance frigorifique de 670.000 frigories-heure. A Paris, la *Société des Glacières de l'Alimentation* (fig. 91) a une installation considérable ; elle possède, en outre d'une machine à ammoniaque Linde de 150.000 frigories-heure, deux groupes frigorifiques puissants installés par la maison Sulzer et comprenant chacun une machine à va-

1. Rey-Basadre, *La Negra Maschwitz Rey Limitada.* (Rapport au premier Congrès International du froid, t. III, p. 169.)



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 91. — Vue de l'un des bacs à glace des *Glacières de l'Alimentation* à Paris (construction Sulzer).

On voit en avant à droite l'appareil de remplissage des mouleaux, le bac de démoulage avec son basculeur et le plan incliné sur lequel glissent les pains de glace après le démoulage. A gauche, vers la moitié du bac, on voit le pont-roulant électrique pour la manutention des rames de mouleaux.

Cette usine à glace, installée par la Société Sulzer, comprend quatre générateurs de glace d'une puissance totale de 1.200.000 frigories-heure.

peur commandant un compresseur double à ammoniaque du type Linde. Les puissances de chacune des machines sont égales normalement à 200 chevaux pour un groupe, à 300 chevaux pour l'autre; elles peuvent être portées à 250 et 350 chevaux. Le compresseur double commandé par la machine de 200 chevaux a une puissance de 500.000 frigories-heure : l'autre compresseur double a une puissance de 650.000 frigories-heure. Chaque groupe de machines dessert deux bacs à glace de 40 et 50 tonnes par vingt-quatre heures (un bac par compresseur), soit une production journalière de 180 tonnes. Les mouleaux ont un poids net de 40 kilogrammes. La température normale du bain incongelable est égale à — 7° et il faut trente-deux heures pour congeler complètement le contenu d'un mouleau. En utilisant également d'anciennes machines Fixary à ammoniaque, cette usine peut produire actuellement 200 à 220 tonnes de glace par vingt-quatre heures.



CHAPITRE VIII

LA CONSERVATION DE LA VIANDE ET LES FRIGORIFIQUES D'ABATTOIRS

1. — Viande réfrigérée. — La viande peut être conservée par le froid ;

a) Soit à l'état de *viande réfrigérée* ;

b) Soit à l'état de *viande congelée*[1].

La viande est dite *réfrigérée* lorsque, dans un courant d'air, elle est soumise à une température voisine de 0°, l'état hygrométrique de l'air ne dépassant pas 75 p. 100. Suivant les compagnies et les habitudes locales, la température de conservation varie de + 3° à — 2° C. Jamais cette température n'est suffisante pour produire, même

1. Voir les rapports suivants présentés au Congrès International du froid tenu à Vienne en 1910.

Rapports de *M. Viry* et de *M. Martel* sur la *valeur comparée des viandes congelées et réfrigérées* : dans le rapport de M. Martel on trouvera l'exposé des recherches si importantes de MM. Armand Gautier et L. Landi sur les actions chimiques du froid sur les viandes.

Query. Modifications qui peuvent être apportées par le froid à la constitution physique, chimique et morphologique des matières alimentaires.

Bützler. Veränderungen in der physikalischen und morphologischen Beschaffenheit von Nahrungstoffen.

Von Wanjenbergh. L'application du froid artificiel à la conservation des viandes de boucherie et à la salaison.

superficiellement, la congélation de la viande ; celle-ci est en somme maintenue dans les conditions où elle se trouve durant l'hiver par un froid sec.

La durée de la conservation de cette viande peut être fixée à *trois semaines*. Durant cet intervalle de temps, la viande conserve toutes ses propriétés physiques (apparence, couleur, consistance), toutes ses propriétés chimiques et nutritives. Il se produit seulement à la surface une légère dessiccation, due au courant d'air produit dans les chambres de conservation. Cette dessiccation est en somme assez légère pour que son importance soit pratiquement nulle, au point de vue commercial comme au point de vue hygiénique.

Durant tout ce séjour dans le froid sec, il se produit une légère transformation dans la viande. Celle-ci se traduit plus particulièrement dans les premiers jours par une sorte de maturation, le *rassiement*. On sait que cette modification, indispensable pour assurer la digestibilité de la viande, est tout à fait nécessaire au point de vue commercial pour développer les qualités de goût et de tendreté de la chair.

La réfrigération est, pour le consommateur, une garantie de la bonne qualité de la viande. Ce mode de conservation ne peut en effet s'appliquer à des viandes provenant d'animaux malsains, fiévreux, surmenés ou contusionnés. La température des chambres froides de réfrigération n'est pas assez basse pour supprimer les fermentations musculaires, qui, en quarante-huit

heures avec des viandes malsaines, donnent une chair rouge, brune et molle.

La réfrigération fournit donc une *viande fraîche, rassise, de qualité hygiénique assurée, de valeur commerciale garantie, de digestibilité parfaite et dans laquelle se sont développées au maximum les qualités de goût, de saveur et de tendreté.*

2. — Viande congelée. — La *viande congelée* est celle qui, placée dans l'air sec et froid, est transformée dans toute sa masse en un bloc solide. On obtient ce résultat, en abaissant *très lentement* la température de la viande maintenue dans un courant d'air froid et sec, de telle sorte que la température au cœur du morceau soit abaissée et maintenue à — 4° C. Quand on opère avec de l'air à — 5° C., c'est-à-dire par une congélation très lente, on n'obtient ce résultat, comme l'a constaté M. le Dr Bordas, qu'au bout de quelques semaines. En pratique, avec de l'air à — 12° ou — 15° C., la congélation se fait en quatre jours environ pour les quartiers de bœuf.

Chaque quartier de viande, une fois congelé, doit être revêtu d'un sac de cotonnade, qui évite l'apparition à la surface de la viande de moisissures acclimatées aux basses températures et donnant parfois quelque odeur sulfureuse. La viande est alors conservée dans des magasins à une température de — 6° à — 8° C. (fig. 92).

La durée commerciale de conservation de la viande congelée est de *six mois*. Durant ce temps, cette viande est absolument équivalente

à la viande fraîche, tant au point de vue scientifique (chimique ou histologique) qu'au point de vue commercial et culinaire. Il se produit seulement une dessiccation légère aboutissant à une perte de 5 à 6 p. 100 du poids de la viande par élimination d'eau, ce qui est de nulle importance au point de vue hygiénique.



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 92. — Frigorifiques de l'Argentine. Magasin de conservation des viandes congelées (construction Sulzer).

Si la congélation de la viande doit se faire lentement, sa décongélation doit également avoir lieu d'une façon aussi lente que possible, dans un courant d'air sec assez violent, et en chambre froide à une température légèrement supérieure à zéro. A Londres on applique depuis vingt ans, aux magasins frigorifiques du Nelson Wharf, le procédé suivant de décongélation inventé par sir Montague Nelson ; il permet de ramener la viande congelée à la température ordinaire sans exsudation, sans perte de jus, sans nuire en un mot à

son apparence. On opère dans des salles chauffées par le bas à 16 ou 18° C. (au moyen de tuyaux de vapeur) et refroidies au plafond où sont fixés des tuyaux à circulation de saumure à la température de — 20° C. Les carcasses de bœuf ou de mouton sont suspendues, séparées les unes des autres, de telle façon que l'air puisse bien circuler tout autour. L'air chaud en montant passe sur les carcasses et vient déposer au plafond son humidité sous forme de givre; l'air froid venant du plafond retombe pour venir à nouveau s'échauffer au contact des tuyaux chauds. Des quartiers de bœuf (moitié d'un bœuf) sont ainsi amenés progressivement en quatre jours à la température normale; des carcasses de mouton demandent deux jours pour parvenir au même état.

Enfin, il convient de ne soumettre à la congélation que les carcasses de bœuf et de mouton, et nullement le foie, le cœur, etc., qui contiennent à leur intérieur des liquides enfermés dans des vaisseaux capillaires, et exigeant pour être solidifiés des abaissements de température incompatibles avec la pratique des installations frigorifiques. Si on introduit ces parties de l'animal dans des chambres, même maintenues à — 8° ou — 9°, l'intérieur ne prend pas une température assez basse pour permettre la conservation.

3. — **Viande réfrigérée et formolée.** — Afin d'éviter l'opération délicate de la décongélation de la viande, on a essayé de transporter la viande à l'état réfrigéré en la mettant dans une atmos-

phère aseptique et en l'aseptisant elle-même à la surface. C'est le procédé *Linley au formol* appliqué actuellement pour le transport de la viande à zéro à bord de cinq grands transports (Guardiana, La Blanca, El Argentino, Manchester-City...) : il permet de conserver en bon état la viande à l'état réfrigéré pendant un laps de temps, qui a pu atteindre trois mois. Le principe du procédé est le suivant [1].

1° Les viandes, après abatage, sont mises à refroidir dans l'atmosphère sèche d'entrepôts réfrigérés ; elles y sont exposées aux vapeurs de formol de manière à stériliser la surface des muscles et les graisses apparentes sans permettre toutefois la pénétration de quantités sensibles de formol dans la viande.

2° Après ce traitement, les viandes pourvues d'enveloppes stérilisées sont descendues en cale froide où les quartiers sont accrochés de manière à éviter les entassements préjudiciables à une bonne conservation. L'air de la cale a reçu au préalable une certaine quantité de formol dans le but de supprimer les moisissures et les bactéries. L'atmosphère formolée est maintenue pendant un temps très court après l'arrimage des viandes toutes suspendues. Un système de vannes permet de chasser l'air formolé en lui substituant

1. On trouvera le détail des expériences auxquelles a donné lieu le procédé Linley dans le remarquable rapport présenté par M. Martel au deuxième Congrès International du froid tenu à Vienne en octobre 1910. (Valeurs respectives et comparées des viandes congelées et des viandes réfrigérées au point de vue de l'alimentation générale, et plus particulièrement de l'alimentation de l'armée).

de l'air sec (desséché par son passage sur du chlorure de calcium), qui a été épuré par barbotage dans un bain d'acide sulfurique. Une fois que l'air formolé a été chassé, on arrête le fonctionnement de l'appareil et on conserve les viandes en chambres froides non ventilées et maintenues entre — 2° et + 0,2. Des appareils permettent d'ailleurs de brasser l'air des cales réfrigérées, de manière à avoir une température constante et partout la même.

M. Martel a rapporté en France un morceau d'aloyau provenant d'un bœuf argentin ; ce morceau avait soixante-deux jours de conservation (vingt-sept de voyage en mer, vingt et un de conservation à Buenos-Aires et quatorze de conservation à Londres). M. Martel a constaté que consommée, soit en rôti, soit en pot-au-feu, la viande s'est montrée irréprochable au point de vue des qualités organoleptiques. Toutefois, il convient de faire des réserves sur la valeur alimentaire de ces viandes conservées par le formol et le froid associés. Le formol forme avec les matières albuminoïdes des composés indigestes ; or, la viande formolée et réfrigérée provenant de la République Argentine peut contenir du formol jusqu'à 2 centimètres de profondeur. On peut alors se demander si de telles viandes ne sont pas capables de nuire à la santé, lorsqu'elles sont consommées d'une façon courante pendant longtemps.

4. — **Réfrigération de la viande.** — Quelles sont les installations qui permettent de réaliser dans

de bonnes conditions la réfrigération de la viande? C'est ce que nous allons maintenant examiner.

La viande fraîche et chaude est d'abord maintenue durant quelques heures dans un courant d'air à la température ordinaire ; elle se refroidit et perd une partie de son humidité. C'est l'opération de l'*essorage*. Cette viande séjourne alors durant dix à dix-huit heures (suivant la grosseur des quartiers de viande) dans un air en mouvement à la température moyenne de 7 à 8° et dont l'état hygrométrique est égal à 85 ou 90 p. 100. Après ce stage, la viande a une température de 10 à 12°. Enfin, la viande est maintenue pendant vingt-huit ou trente heures dans un courant d'air dont la température ne dépasse pas + 3° C. et dont l'état hygrométrique n'est pas supérieur à 75 p. 100. Après une telle exposition, c'est-à-dire environ quarante-huit heures après l'abatage, la viande est obtenue à l'état de *viande réfrigérée*. La viande pour parvenir à l'état de réfrigération, parcourt donc trois stades :

1° Essorage ou ressuage ;

2° Premier stade de réfrigération durant lequel la viande passe de 30° à 12° environ ;

3° Deuxième stade de réfrigération durant lequel la viande passe de 12° à une température qui ne dépasse pas + 3°.

5. — Frigorifique pour la réfrigération de la viande. — Ces stades se font dans trois salles différentes qui communiquent les unes avec les autres.

a) *Salle d'essorage* à la température ordinaire ; elle sépare la halle d'abatage du frigori-

fique proprement dit. Cette salle, parfois réduite à un hangar ouvert, porte au plafond des rails de roulement, qui permettent de pousser les carcasses suspendues verticalement depuis la halle d'abatage jusqu'au frigorifique, sans qu'il soit nécessaire de les empiler sur des chariots.

Le frigorifique proprement dit se compose :



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 93. — Chambre froide d'abattoir avec loges grillagées de part et d'autre du couloir.

b) *De l'anti-chambre froide* (séjour dix à dix-huit heures) ;

c) *De la chambre froide proprement dite*, dans laquelle la réfrigération est réellement obtenue.



Fig. 94. — Chambre froide de boucherie.

Les dimensions des chambres

froides doivent être telles que l'air froid et sec circule librement autour des morceaux de viande suspendus. C'est là d'ailleurs une des conditions générales de la conservation de la plupart des denrées.

Les chambres à conservation de viande (antichambre froide et chambre froide) doivent être



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 95. — Boucherie A. Friedrich à Winterthur. Chambre froide à viande (construction Sulzer).

disposées au-dessus du sol, et autant que possible jamais en-dessous, afin d'éviter une trop grande humidité défavorable à la conservation de la viande.

6. — **Chambre froide pour la réfrigération de la viande** (fig. 93, 94, 95, 96, 97). — La superficie utilisable d'une chambre froide doit être telle qu'on puisse y accrocher sur une seule rangée 150 kilogrammes de viande par mètre carré ; les morceaux de viande sont alors assez espacés. Des

passages de service doivent être ménagés ; la longueur de ces passages doit être de $1^m,30$ environ. La superficie totale de la chambre froide est alors égale à sa superficie utilisable augmentée d'environ 1/3 de cette valeur.

La hauteur d'une chambre froide ne doit pas dépasser $3^m,50$ quand, comme c'est le cas général,



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 96. — Boucherie d'exportation Samuel Bell Sœhne A. G. à Bâle. Cave à saucisses (construction Sulzer).

il n'y a qu'une seule rangée de crochets à viande. On évite ainsi de refroidir à la partie supérieure de la chambre un espace inutile. Lorsque les canaux de circulation de l'air froid, canaux suspendus au plafond, sont larges et plats, la hauteur de la chambre froide peut être réduite à 3 mètres. On n'installe pas en effet en général de rails de roulement dans la chambre froide, afin de ne pas accroître d'une manière souvent peu opportune les frais de la construction.

La chambre froide est généralement divisée

en loges fermées à clef qui sont louées à des bouchers. Les parois de ces loges sont métalliques ; les montants sont en fer profilé et les parois en tôle perforée ou à barreaux ronds : le tout est galvanisé et recouvert d'une peinture spéciale blanche qui se prête à des lavages fréquents. Les parois de ces loges s'arrêtent en hau-



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 97. — Chambre de congélation dans les frigorifiques argentins construits par la maison Sulzer.

teur à une certaine distance des canaux en bois du plafond ; ce dispositif joint à l'existence des parois perforées, permet la libre circulation de l'air. La tôle perforée est préférable à tout autre mode de clôture, parce qu'elle n'est pas susceptible de retenir accrochés de petits morceaux de viande. Afin de gagner de la place, la porte est à coulisse le long des parois. Chaque loge est pourvue de rangées de crochets fixes et mobiles en fer étamé.

Les parois de la chambre froide ne doivent pas

offrir aux microbes un terrain de culture. On doit les recouvrir de plaques de céramique blanche et facilement lavables. On augmente l'impression de propreté de l'ensemble en pavant les loges et les passages de service au moyen de carreaux cannelés jaune-clair. Entre deux loges consécutives, il est bon de relever le plancher



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 98. — Abattoirs de Saint-Imier. Antichambre froide (construction Sulzer).

de 10 centimètres, afin d'empêcher que, dans le lavage du plancher d'une loge, l'eau vienne s'écouler dans la chambre contigue.

Enfin, l'éclairage de la chambre froide se fait, soit avec la lumière du jour, soit avec des lampes à incandescence.

7. — Antichambre froide. Chambre de préréfrigation. — La superficie de l'antichambre froide doit être égale au moins au 1/3 de celle de la chambre froide. Comme des rails de roulement existent au

plafond, une hauteur égale à au moins 4 mètres est nécessaire (fig. 98). Dans les grands abattoirs, il existe même deux antichambres froides, une pour le gros bétail et une pour le petit bétail (moutons).

8. — Salle pour salaisons. — Dans un très grand nombre d'abattoirs allemands existent des *salles pour salaisons*. Elles doivent être entièrement séparées des chambres froides (antichambre et chambre froide proprement dite) : elles possèdent soit un frigorifère sec à tuyaux suspendus au plafond de la chambre (circulation naturelle) ; soit un frigorifère sec ou humide extérieur à la chambre (circulation artificielle avec canaux d'air dans la chambre) qui est entièrement distinct du frigorifère des chambres à viande. Ce dernier système par ventilation a l'avantage d'enlever toutes les odeurs qui peuvent prendre naissance dans les salles. La température de ces salles à salaisons est généralement de + 6° à + 8° ; l'état hygrométrique de l'air est voisin de 90 à 95 p. 100. Dans ces salles existent des bacs de salaisons qui sont, soit en fer émaillé isolé, soit en ciment avec revêtement intérieur de verre soluble ou plaques épaisses de verre brut.

Une précaution à prendre lors des salaisons est de ne pas mettre la viande venant de l'extérieur immédiatement en contact avec la saumure à + 8° C. environ, dans laquelle parfois se trouve déjà de la viande en bonne conservation de salaison. En effet, la température s'élèverait dans le bac à salaisons et on risquerait de compro-

mettre la bonnè réussite de l'opération existante et future. On refroidit donc préalablement la viande dans l'antichambre froide et on lui laisse prendre la température de la salle à salaisons avant de la plonger dans la saumure.

Il faut également bien veiller à ce que la température et la densité de la saumure restent constantes.

La durée de l'immersion dans la saumure varie avec la nature de la viande. Pour les jambons, par exemple, elle est d'environ vingt-et-un iours.

Lorsqu'elles ont été retirées des bacs saloirs, les viandes doivent encore séjourner dans la salle des salaisons pendant un temps au moins égal à celui de leur immersion ; de cette manière la viande s'imprègne bien de sel.

9. — **Sur quelques règles concernant l'exploitation des frigorifiques.** — Au point de vue de l'exploitation du frigorifique, certaines règles très importantes doivent être observées.

a) En premier lieu, il convient de tenir la main à ce que la plus grande propreté règne dans le frigorifique.

b) De la viande salée ne doit pas être conservée dans la chambre froide.

c) On ne doit conserver dans la chambre froide ni intestins, ni peaux, ni parties de l'animal dégageant de mauvaises odeurs.

d) La viande, qui est introduite de nouveau dans la chambre froide après en avoir été retirée, doit être soigneusement examinée avant

cette réintroduction ; toute viande, qui a subi un commencement de décomposition ne doit pas être admise. Il est préférable, à tous égards, de ne pas rentrer dans la chambre froide de la viande qui a été mise à l'étal.

e) Les heures d'ouverture des chambres froides doivent être fixées et doivent être observées le plus strictement possible.

Ces conditions sont parfois difficiles à maintenir pour tous les usagers de l'industrie du froid. Aussi existe-t-il dans la plupart des entrepôts frigorifiques des salles communes pour viandes de boucherie, salles entièrement distinctes des salles munies de cases : dans ces salles on permet généralement d'y rentrer la viande qui a séjourné à l'étal. Dans d'autres grands abattoirs existent même des salles spéciales pour viandes malades et des salles pour viandes douteuses ; elles n'ont aucune communication avec les autres.

10. — Conservation de la viande de cheval réfrigérée. — Dans ce qui précède, il est surtout question de la conservation du bœuf, du mouton et du porc réfrigérés. Mais certains frigorifiques allemands admettent maintenant de la viande de cheval. L'étude de la conservation de cette viande a conduit aux résultats suivants [1].

Supposons d'abord qu'il s'agisse de chevaux en état normal abattus après un temps de repos suffisant.

1. Alexander Costa et Nello Mori. *Untersuchungen über die Konservierung von Pferdefleisch mittelst Kälte und dessen Verwendung zu Nahrungszwecken.* (Rapport présenté au deuxième Congrès International tenu à Vienne en octobre 1910).

1° Si l'animal entier, après avoir été vidé, est laissé dans sa peau — ou si, dépouillé de celle-ci, il est divisé en quatre, il peut se conserver durant deux mois, s'il est maintenu dans un courant d'air à une température de + 1° à + 4° et à un état hygrométrique de 60 à 70 p. 100.

2° L'animal entier, revêtu de sa peau, sorti du frigorifique après cinq jours d'action du froid, ramené durant vingt-quatre heures à la température ordinaire, enfin réintroduit dans la chambre froide, se conserve en bon état durant vingt à trente jours.

Ce même animal dépouillé de la peau, découpé en quatre parties, puis traité de la manière précédente, ne se conserve que quinze à vingt jours.

3° La carcasse, découpée en petits morceaux, ne se conserve au frigorifique dans les mêmes conditions que vingt-cinq à trente jours.

Des chevaux, qui ont été abattus après un accident et préparés (saignés, vidés) deux ou trois heures après, peuvent se conserver trente à quarante jours au frigorifique dans les conditions que nous venons d'indiquer.

Enfin, de la bonne viande de cheval (animal divisé en quatre), refroidie durant quinze à vingt-cinq jours, puis bouillie dans de l'eau légèrement salée, peut être après cette opération, conservée au frigorifique durant trente jours.

La viande de cheval est conservée dans des salles froides spéciales.

11. — Exemple d'un frigorifique d'abattoir. — Don-

nons un exemple d'un frigorifique d'abattoir, construit dans de bonnes conditions.

Arnheim, ville hollandaise située sur le Rhin (rive droite), a normalement 70.000 habitants; mais dans l'été, sa population augmente beaucoup par suite de la présence de nombreux étrangers. La maison Borsig, de Berlin, y a établi un frigorifique d'abattoir, qui représente les derniers perfectionnements de ce mode de construction. Nous avons, dans ce livre, pris comme exemple le mode d'isolement de ce frigorifique. Nous allons maintenant indiquer comment ont été établies les chambres froides de cet abattoir.

Ces chambres ont été construites en prévoyant un abatage maximum de 170 moutons, 150 porcs, 60 bœufs, 45 veaux et 15 chevaux. Entre les halles d'abatage et les chambres froides se trouve la chambre d'essorage, qui a 9 mètres de large et 40 mètres de longueur; elle est éclairée abondamment par la lumière du jour au moyen de fenêtres, dont les diverses parties peuvent basculer autour d'un axe horizontal, de manière à produire une aération suffisante de la pièce. Cette salle porte au plafond des rails de roulement pour le transport des carcasses venant des halles d'abatage et allant aux chambres froides. Cette salle d'essorage, maintenue à la température ordinaire, sert elle-même d'antichambre à l'antichambre froide et diminue par conséquent les variations de température de cette chambre.

1. G. Versteeg. *Die Kühlanlage auf dem städtischen Schlachthofe zu Arnheim.* (Zeitschrift für die gesamte Kalte-Industrie, 19e année, février et mars 1912).

L'antichambre froide a 5^m,25 de hauteur, 12 mètres de largeur et 20 mètres de longueur. La chambre froide proprement dite a 3^m,65 de hauteur, 18^m,05 de largeur et 29^m,50 de longueur. Ces deux chambres sont fortement éclairées par la lumière du jour. Pour la chambre froide notamment, non seulement des fenêtres sont percées dans le mur extérieur, mais encore 8 lanterneaux (à 4 couches de vitres) permettent d'amener cette lumière par le plafond lui-même ; ces vitres sont d'ailleurs montées sur châssis mobiles afin de faciliter en hiver l'aération de la chambre.

Actuellement il y a à Arnheim environ 110 bouchers. Dans la chambre froide on a installé 92 loges, dont les superficies varient entre 2 et 4^{m2},70. La superficie totale de ces loges (superficie utile de la chambre) est d'environ 350 mètres carrés pour une superficie totale de la chambre froide égale environ à 532 mètres carrés. Les couloirs de service sont très larges, 2 mètres à 1^m,50. Les parois des loges sont en fers profilés et barreaux ronds ; un toit en toile métallique les recouvre à la partie supérieure. Nous préférons pour les parois la tôle perforée plus facile à tenir propre que les barreaux qui doivent être très rapprochés pour empêcher les vols, ce qui rend le nettoyage plus difficile. Les loges ont 2^m,50 de hauteur ; comme la base des canaux de circulation d'air est à une hauteur de 2^m,75, il reste au-dessus des loges un espace suffisant pour le nettoyage. Les parois des loges reposent sur des socles de 12 centimètres de

hauteur en briques émaillées. Le prix de location des loges est de 37,50 par mètre carré et par an.

Il existe une salle à salaisons dont la superficie est égale à $12 \times 5^{m},95$. Elle comprend 13 loges dont la superficie est $1^{m},60 \times 2^{m},05$; les parois de ces loges sont en pitchpin. Les cuves à salaisons sont en briques émaillées. Le refroidissement est effectué au moyen de tuyaux à ailettes suspendus au plafond. Le renouvellement de l'air peut se faire au moyen d'un ventilateur mu par un électro-moteur.

12. — Calcul d'un frigorifique d'abattoir. — A propos de cet exemple, calculons le nombre de frigories nécessaires pour refroidir les chambres froides de cet abattoir.

On a prévu environ 2 abatages par semaine (environ 100 abatages par an) et dans chaque abatage une quantité maxima de viande égale à

$$\underbrace{170 \times 30}_{\text{moutons.}} + \underbrace{150 \times 85}_{\text{porcs.}} + \underbrace{60 \times 270}_{\text{bœufs.}} + \underbrace{45 \times 34}_{\text{veaux.}} + \underbrace{15 \times 250}_{\text{chevaux.}}$$

$= 39.330$ kilogrammes de viande ou en nombres ronds 40.000, soit 80.000 kilogrammes de viande par semaine.

On doit pouvoir loger dans la chambre froide un poids de viande égal à celui de chaque abatage, ce poids étant augmenté d'environ 1/4 de sa valeur, soit dans le cas actuel 50.000 kilogrammes de viande.

Si on compte 150 kilogrammes de viande logés par mètre carré, on voit que la superficie totale de la chambre froide devra être de 335 mètres carrés ; on a pris ici 350 mètres carrés. Avec des couloirs de service de $1^{m},30$ de lar-

geur, on aurait ici une superficie totale de la chambre froide égale à

$$335 + 1/3 \times 335 = \mathbf{446} \text{ mètres carrés environ.}$$

Les constructeurs ont pris des couloirs de service plus larges et une superficie totale de 532 mètres carrés.

Comme nous l'avons vu plus haut, les dimensions de l'antichambre froide et de la chambre froide sont :

ANTICHAMBRE FROIDE		CHAMBRE FROIDE	
Hauteur. .	**5**^{m},**25**	Hauteur. .	**3**^{m},**65**
Largeur. .	**12** mètres	Largeur. .	**18**^{m},**05**
Longueur .	**20** —	Longueur .	**29**^{m},**50**

Les températures sont les suivantes :

Air extérieur.	+ **30**°C.
Viande après l'abatage	+ **30**°C.
Sol	+ **10**°C.
Chambre froide	+ **2**°C.
Antichambre froide.	+ **6**°C.

Prenons comme coefficients de transmission de chaleur 0,40 pour les murs extérieurs ; 0,45 pour le sol ; 0,50 pour le plafond, afin de calculer largement l'installation.

Calculons d'abord les frigories à produire pour compenser *l'échauffement par les parois*.

Chambre froide :

Sol	532 (10 — 2) × 0,45 =	1.915,2
Plafond	532 (30 — 2) × 0,50 =	7.448
Murs.	2 × 18,05 × 3,65 (30 — 2) × 0,40 =	1.475,8
	29,50 × 3,65 (30 — 2) × 0,40 =	1.206
	29,50 × 3,65 (6 — 2) × 0,40 =	172,3
	(contigu à l'antichambre froide)	
Total	=	**12.217,3**

Antichambre froide :

Sol	$240\ (10 - 6) \times 0{,}45 =$	432
Plafond	$240\ (30 - 6) \times 0{,}50 =$	2.880
Murs.	$2 \times 12 \times 5{,}25\ (30 - 6) \times 0{,}40 =$	1.209,6
	$20 \times 5{,}25\ (30 - 6) \times 0{,}40 =$	1.008
	$20 \times 5{,}25\ (6 - 2) \times 0{,}40 =$	168
	(contigu à la chambre froide)	
Total	=	**5.697,6**

La dépense totale de frigories par échauffement des parois est, pour vingt-quatre heures,

$$[12.217{,}3 + 5.697{,}6]\ 24 = \mathbf{429.957{,}6}$$

ou, en nombres ronds,

429.958 frigories

Quel est maintenant le nombre de frigories à produire pour la *réfrigération de la viande ?*

Il faut environ quarante-quatre heures pour refroidir les 40.000 kilogrammes de viande que l'on introduit par abatage, depuis la température extérieure de 30° jusqu'à la température de 2° de la chambre froide. Si on prend 0,75 pour chaleur spécifique de la viande, on a une dépense de frigories égale à

$$40.000 \times 0{,}75\ (30 - 2) = \mathbf{840.000}$$

soit, par vingt-quatre heures, une dépense de

$$\frac{840.000 \times 24}{44} = \mathbf{458.000} \text{ frigories.}$$

L'air des chambres doit être totalement renouvelé environ 6 fois par vingt-quatre heures. Calculons le nombre de frigories à produire de ce

chef. Supposons que l'air extérieur soit à l'état hygrométrique 0,90. Afin de faire largement ce calcul, supposons qu'il s'agisse de faire passer de la température de 30° (état hygrométrique = 0,90) à la température de + 4° (moyenne entre les températures de l'antichambre froide et de la chambre froide) et à l'état hygrométrique de 0,70, un volume d'air égal au volume total de l'antichambre et de la chambre froides.

Ce volume est égal à

$$240 \times 5{,}25 + 532 \times 3{,}65 = \mathbf{3.202} \text{ mètres cubes.}$$

Le passage de ce volume d'air sec, à pression constante, de la température de 30° à celle de 4° nécessite la production de

$(30 - 4) \times 3\,202 \times 1{,}293 \times 0{,}237 =$ **25.808** frigories environ.

1,293 = poids de 1 mètre cube d'air.

0,237 = chaleur spécifique de l'air sous pression constante.

Comme l'air est complètement renouvelé 6 fois par vingt-quatre heures, le refroidissement de l'air sec exige par vingt-quatre heures la production de

$$6 \times 25.808 = \mathbf{154.848} \text{ frigories.}$$

A 30° C. un mètre cube d'air saturé contient $0^{kg},029$ de vapeur d'eau, et à 4° C. il en contient $0^{kg},00636$.

Un mètre cube d'air humide à 30° C. d'état hygrométrique 0,90 contient donc

$$0{,}029 \times 0{,}9 = \mathbf{0^{kg},0261} \text{ vapeur d'eau.}$$

Un mètre cube d'air humide à 4° C. et d'état hygrométrique 0,70 contient :

0,00636 × 0,7 = **0kg,004452** vapeur d'eau.

Quand un mètre cube d'air passe du premier état au second, il se condense donc par mètre cube

0,0261 — 0,004452 = **0kg,02165** d'eau.

Il faut produire environ 610 frigories quand on condense 1 kilogramme de vapeur d'eau à 30° C. et qu'on l'amène à l'état d'eau à 4°.

Le nombre de frigories nécessaires pour la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les 6 × 3.202 mètres cubes d'air humide est donc

6 × 3.202 × 0,02165 × 610 = **253.723** frigories environ.

Récapitulons le nombre des frigories à produire par jour.

Transmission de la chaleur au travers des parois	429.958
Réfrigération de la viande.	458.000
Renouvellement de l'air	154.848
	253.723
Total.	**1.296.529**

Ajoutons 10 p. 100 de ce nombre pour les pertes de frigories par ouverture des portes et par la circulation du personnel dans les chambres froides, et 2 p. 100 pour l'échauffement produit par l'éclairage, nous voyons que le nombre des frigories à produire par jour est égal à

1.296.529 + 129.653 + 25.931 = **1.452.113** frigories.

Supposons que l'on fasse marcher les compres-

seurs seize heures sur vingt-quatre, il faudra une puissance en frigories-heure égale à

$$\frac{1.452.113}{16} = \mathbf{90.757} \text{ frigories-heure.}$$

Prenons deux compresseurs de 60.000 frigories-heure chacun. L'excès de puissance, soit 29.243 frigories-heure peut être utilisé pour produire environ 4.000 kilogrammes de glace par jour. C'est d'ailleurs ce qui a été fait à l'abattoir d'Arnheim. En élevant le nombre de tours de l'un des compresseurs, on peut augmenter sa puissance frigorifique de 25 p. 100 (75.000 frigories-heure) ; ce compresseur, marchant durant vingt heures, peut faire le service de l'ensemble des chambres froides. On peut donc marcher avec un seul compresseur, si l'un des deux vient à être mis hors de service.

Si, pour produire les 1.452.113 ou, en nombres ronds, les 1.455.000 frigories nécessaires pour le refroidissement des chambres, on emploie des frigorifères à pluie d'eau salée, on peut calculer de la manière suivante le volume total de ces frigorifères. L'air venant des chambres entre au frigorifère à une température moyenne de + 4° C et en sort, après contact avec la saumure, à une température d'environ — 3° C (saumure à une température de — 5° C) : on peut donc admettre que la température moyenne de l'air qui circule dans le frigorifère est égale à 0°. Or, avec un tel frigorifère, on compte une production de 500 frigories par mètre cube de l'espace où ruisselle la saumure, par heure et par degré

de différence de température entre la saumure et l'air à la température moyenne de 0°. Le volume du frigorifère est donc, pour une marche de seize heures par jour

$$\frac{1.453.000}{500 \times 16 \times 5} = \mathbf{37} \text{ mètres cubes environ.}$$

Comme l'air total des chambres doit passer au frigorifère environ dix fois par heure, le débit des ventilateurs est par minute

$$\frac{32.020}{60} = \mathbf{534} \text{ mètres cubes environ.}$$

13. — Viande congelée. Dimensions des chambres de congélation et de conservation. — Les chambres de congélation (à des températures de — 12° C à — 15° C) contiennent par mètre cube environ 3,5 carcasses de mouton et 0,25 carcasse de bœuf. La hauteur de ces chambres est voisine de $3^m,50$. Le refroidissement se fait par circulation artificielle d'air. On peut employer, pour refroidir l'air, un frigorifère sec extérieur. Si le fluide frigorigène, qui circule dans les tuyaux de ce frigorifère, est à — 20° C, il faut compter environ $0^{m^2},4$ de surface réfrigérante par mètre cube de chambre de congélation (vitesse de circulation de l'air égale à environ 4 mètres par seconde). Si on emploie des tuyaux lisses de 51×57 millimètres, il faut $2^m,40$ de ces tuyaux par mètre cube de chambre de congélation. L'air total de la chambre doit passer environ 40 à 50 fois par heure dans le frigorifère.

Les magasins de conservation (à la tempéra-

ture de — 7 à — 8° C.) contiennent par mètre cube en vrac 15 carcasses de mouton ou 1,1 carcasse de bœuf. Le refroidissement se fait généralement par tuyaux suspendus au plafond ou étagés le long des parois. Ces serpentins réfrigérants sont destinés uniquement à maintenir la viande en état de congélation ; il ne se produit par conséquent aucun dépôt d'humidité provenant de la viande, de sorte que les batteries frigorifiques ne se couvrent pas de givre.

14. — Charles Tellier et la réfrigération de la viande. — Il est intéressant de faire ici l'historique du développement de l'application du froid à la conservation de la viande.

La réfrigération de la viande a été préconisée et appliquée pour la première fois par un Français, l'ingénieur *Charles Tellier*. Dès 1873, ce savant soumet au contrôle d'une commission de l'Académie des Sciences des expériences montrant la *conservation de la viande par le froid sec au voisinage de zéro*. Un rapport favorable est inséré en 1874 dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Il constate que la durée de la conservation des matières organiques dans la chambre froide peut être considérée comme indéfinie, au point de vue de la *putrescibilité ;* mais qu'il n'en est pas tout à fait de même à l'égard de la *comestibilité*. Dans les quarante ou quarante-cinq premiers jours, les viandes de boucherie conservées par le froid retiennent complètement leurs qualités comestibles ; elles s'améliorent même durant la première semaine, en ce

sens que, tout en conservant leur arôme, elles acquièrent plus de tendreté et sont pour cela même plus facilement digestives. D'ailleurs les expériences de M. Tellier donnèrent de bons résultats tout aussi bien avec les grosses pièces (cuissot de bœuf de 70 kilogrammes) qu'avec les petits morceaux de viande. Le rapport de l'Académie constate enfin que, si M. Tellier n'a pas inventé l'action préservatrice du froid, il a eu cependant « le premier l'idée de créer une atmos-
« phère froide et sèche, dans laquelle les matières
« organiques que l'on veut conserver sont main-
« tenues en permanence, atmosphère que l'on
« fait circuler incessamment de la chambre froide
« vers l'appareil frigorifique et réciproquement,
« de manière à la maintenir toujours à la tempé-
« rature conservatrice et à la dépouiller inces-
« samment par un passage sur les plaques du
« frigorifère, des vapeurs dont elle s'est chargée
« dans la chambre froide. »

Ainsi dès 1874, grâce à M. Charles Tellier, on connaît, au point de vue des applications du froid à la conservation des denrées, l'importance primordiale de la constance de la température dans certaines limites, du degré hygrométrique de l'air, de la pureté de l'atmosphère des chambres froides.

15. — **Charles Tellier et le transport à longue distance de la viande réfrigérée.** — C'est encore à M. Charles Tellier que revient l'honneur d'avoir essayé, *le premier*, l'exploitation industrielle de la réfrigération employée comme moyen de con-

servation, ainsi que le transport, *à de longues distances*, de viandes refroidies à zéro dans l'air sec. En 1876, notre compatriote arme un navire de 700 tonneaux, mu par une machine de 300 chevaux, auquel il donne le nom de *Frigorifique*. Il y installe trois machines frigorifiques (de 20.000 frigories-heure chacune) et une chambre froide bien isolée, dans laquelle on embarque des quartiers de bœuf et de mouton. Le *Frigorifique*, parti de Rouen vers le milieu de septembre, entre dans le port de Buenos-Aires le 25 décembre après cent cinq jours environ de traversée. Certains morceaux de viande embarqués à Lisbonne ont cinquante jours de conservation, les autres cent cinq jours. Les premiers ont l'odeur naturelle et l'apparence de la viande fraîche ; les seconds laissent à désirer au point de vue de la comestibilité, bien qu'en bon état de conservation.

Une expérience est alors tentée. La *Société Rurale Argentine* fait embarquer dans la chambre froide du navire 73 carcasses de bœufs domestiques, 22 carcasses de bœufs sauvages, 200 moutons, soit un total de 35.000 kilogrammes de viande. Après un mois de séjour dans la cale réfrigérante, un banquet est donné à bord où l'on ne sert que des viandes réfrigérées. Le succès est complet.

Le *Frigorifique* revient en Europe avec son chargement de viande fraîche et arrive à Rouen le 14 août 1877. La viande est en excellent état, après cent dix jours de conservation ; les bouchers, appelés à l'examiner, la décla-

rent comme étant de *grande seconde qualité.*

Malheureusement ces expériences n'ont pas de lendemain. Après avoir été un objet de curiosité à l'Exposition de 1878, le *Frigorifique* est vendu à une compagnie, qui l'emploie à un tout autre trafic.

16. — L'essai du Paraguay; le transport de la viande congelée. — Toutefois l'essai de réfrigération, fait par M. Tellier est suivi en 1877 d'un essai de transport de viandes congelées, fait par la Société Marseillaise Julien et Cie.

Le 23 septembre 1877, le *Paraguay* (vapeur de 1.120 tonneaux) aménagé en frigorifique fait son entrée dans le port de Buenos-Aires. Il est pourvu de 3 machines frigorifiques à ammoniaque produisant le froid nécessaire pour congeler 150 tonnes de viande. Les chambres, dans lesquelles règne une température de — 28° à — 31° C. renferment : un bœuf divisé en quatre quartiers, dix moutons entiers. Embarquées le 31 août, ces viandes arrivent après quarante-sept jours de conservation. La Commission de la Société Rurale Argentine fait les constatations suivantes :

1° La vue de la viande du *Paraguay*, *une fois dégelée*, est à un premier examen, absolument semblable à celle de la viande provenant d'un animal récemment abattu ; n'importe quel consommateur la confondrait avec de la viande fraîche ;

2° Son goût ne diffère en rien du goût naturel ;

3° Cette viande met, avant de se dégeler, un temps suffisamment long pour pouvoir être trans-

QUES EN ARGEN

national du Froid par le

Machines frigorifiques. Type.	Machines frigorifiques. Puissance	TIONS
	(400 tonn glace p heures).	
VER PLATE FRESH M		
Linde.	3.000. (600 tonn glace p heures)	
A (*Compagnie Sansi*		
Sulzer.	1.700.0 (340 tonn glace p heures). 300.000 550.000 550.000	

portée en wagons isolants, ce qui permet de la porter aux marchés de grande consommation éloignés des ports.

Le *Paraguay* prend en Argentine une cargaison de 80 tonnes de viande qu'il ramène en Europe à l'état de congélation. Il part de Buenos-Aires à la fin d'octobre 1877 et n'entre au port du Havre qu'en juin 1878, à cause d'avaries et d'un séjour prolongé sur les côtes du Sénégal, où il est jeté par la tempête. Malgré ce long temps de retour (près de huit mois), les viandes du *Paraguay* arrivent dans un état qui dépasse toutes les espérances tant par leur conservation que par leur qualité. Le chargement des 80 tonnes de viande est utilisé jusqu'au dernier morceau : un banquet, où l'on sert de ces viandes, est offert aux autorités et au commerce du Havre ; le Grand Hôtel de Paris se sert de cette viande durant une semaine ; les troupes de la garnison du Havre en mangent durant plusieurs jours.

Malgré sa réussite, cette seconde tentative n'a pas plus de succès que la précédente. Les applications de la réfrigération et de la congélation à la conservation des viandes sont d'origine française ; mais nous allons le voir, ce n'est pas notre pays qui a étendu ce domaine industriel.

17. — L'industrie de la viande en Argentine. — Ce sont les Argentins qui, comprenant l'importance des expériences du *Frigorifique* et du *Paraguay*, se préoccupent de développer le commerce des viandes congelées [1].

1. P. Bergès. *Rapport présenté au Premier Congrès International*

La première exportation de viande congelée en Angleterre est faite en 1883 par *Eugène Terrasson*, Français, établi à San Nicolas de los Arroyos (province de Buenos-Aires). Ce premier essai est fait de quartiers postérieurs de moutons, la partie antérieure (cou, épaules et côtes) étant fondue pour en obtenir la graisse, parce que à cette époque les moutons n'avaient pas la conformation de l'animal de boucherie.

L'exportation des bœufs congelés commence en 1885. A cette époque (1884-1885) l'Australie n'envoie pas encore de bœuf congelé à Londres, parce que, malgré l'expérience du *Paraguay*, on n'est pas parvenu à congeler les grosses pièces dans de bonnes conditions.

L'industrie de la viande congelée et réfrigérée se développe alors rapidement en Argentine. A l'heure actuelle, il existe huit grands abattoirs frigorifiques, qui, dans le premier semestre de 1910, ont abattu 470.492 bœufs; 1.635.117 moutons ; 12.510 porcs.

On trouvera plus loin un tableau donnant les principales caractéristiques de ces abattoirs ainsi que celles du *Frigorifica Uruguaya* installé par la firme Sulzer (fig. 99).

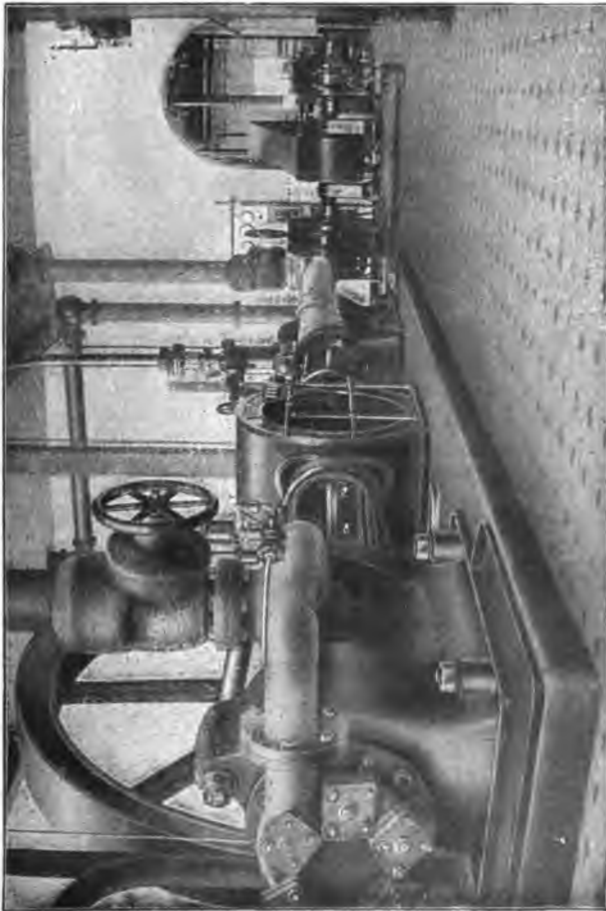
Voici comment les viandes sont préparées dans ces abattoirs.

Les moutons à leur arrivée à l'établissement,

du froid tenu à Paris 1908. (Publications du Ministère de l'Agriculture de la République Argentine).

Nicolas T. Suárez. *Rapport présenté au Deuxième Congrès International du froid tenu à Vienne* en octobre 1910. (Publications du Ministère de l'Agriculture de la République Argentine).

après avoir été soumis à l'inspection vétérinaire,



Cliché Sulzer frères à Winterthur (Suisse).

Fig. 99. — Frigorifica Uruguaya à Montevideo (construit par la maison Sulzer).
Compresseur double Sulzer d'une puissance de 550.000 frigories-heure.

restent au repos pendant douze heures dans un

pâturage ; après quoi on les fait passer dans les cours intérieures, où ils séjournent vingt-quatre heures. Pendant ce dernier laps de temps, les moutons n'ont que de l'eau à leur disposition. Après l'habillage, les animaux restent le temps nécessaire dans les salles d'essorage, puis on les transporte au moyen de trolleys dans les antichambres froides, d'où ils passent dans les chambres de congélation. Cette opération terminée, chaque carcasse de mouton est mise dans un sac de coton blanc et emmagasinée dans des chambres froides jusqu'au moment de l'embarquement.

Les bœufs sont conduits directement aux pâturages, où ils séjournent de cinq à huit jours, selon les nécessités du frigorifique. On les baigne, soit en les obligeant à nager 30 à 40 mètres ; soit en leur donnant une douche au moyen de tuyaux perforés qui laissent tomber sur les animaux, en groupe de 30 ou 40, une pluie d'eau fraîche, qui les nettoie et les tranquillise. Une fois abattus, ces bœufs sont divisés en deux moitiés qu'on pèse avant d'entrer à la salle d'essorage, où on les laisse durant quelques heures. Après cette opération, des rails aériens transportent les carcasses dans les chambres de réfrigération ou de congélation. Avant d'y entrer, les carcasses sont divisées en quartiers et classées pour en faire soit du *chilled beef* (bœuf réfrigéré), soit du ***hard beef*** (bœuf congelé).

Après réfrigération ou congélation, chaque quartier de chilled beef ou de hard beef est mis dans un sac de coton qu'on recouvre d'un autre

sac de chanvre. Cela fait, on les dépose dans des magasins froids jusqu'au moment de l'expédition.

Tous les sous-produits sont exportés. Les langues, rognons, foies, panses, cervelles, cœurs, suifs et graisses, tripes, sang et autres résidus, sont préparés d'une façon appropriée à cet effet.

Les cuirs des bœufs sont mis dans la saumure durant vingt ou trente jours ; après ce délai, ils sont exportés.

Tous les produits se chargent directement de l'abattoir au transatlantique. D'autres fois cependant, quand, pour une raison quelconque, le vapeur ne peut venir faire son chargement, l'établissement dispose de chalands pourvus de chambres réfrigérantes d'une capacité suffisante pour recevoir 1.000 quartiers de bœufs et 4.000 moutons. Il suffit généralement de 3 ou 4 voyages pour charger un transatlantique.

18. — Les abattoirs frigorifiques aux Etats-Unis. — Aux *Etats-Unis* le nombre des abattoirs pourvus de frigorifiques n'est pas inférieur à 1.200. Quelques-uns de ces établissements ont d'immenses chambres froides. Par exemple, à l'usine Armour de Kansas-City, les chambres atteignent 280.000 mètres cubes ; elles sont refroidies par 70 machines frigorifiques d'une puissance égale à 8.400.000 frigories-heure (1.680 tonnes de glace par vingt-quatre heures). On peut estimer à 3.000.000 mètres cubes environ la capacité des chambres froides à viande aux Etats-Unis.

19. — Les frigorifiques d'abattoirs en Allemagne. — En Europe, c'est l'*Allemagne* qui tient le premier rang au point de vue du nombre et du bel agencement des frigorifiques d'abattoirs. En 1902, il existait 281 abattoirs allemands dotés de frigorifiques sur 839 existants. De 1902 à 1911, on compte 60 créations de frigorifiques dans les abattoirs qui n'en étaient pas pourvus, 53 agrandissements de frigorifiques existants, et 51 créations d'abattoirs nouveaux comportant tous des chambres froides. On peut dire qu'actuellement le nombre des abattoirs allemands dotés de chambres froides modernes dépasse 400.

20. — L'abattoir de Berne. — La Société Genevoise pour la construction d'instruments de physique et de mécanique vient de construire pour la ville de Berne un frigorifique d'abattoir dont les plans sont représentés sur les fig. 100 à 103.

Ce frigorifique comprend :

a. *Pour les bœufs, les moutons et les porcs :*

1° Deux salles de découpage à des températures comprises + 12 et + 15 degrés, de surfaces de sol égales à 164 et 140 mètres carrés, de hauteur égale à $5^{m},60$;

2° Deux antichambres froides, à des températures comprises entre + 6 et + 8 degrés, de surfaces de sol égales à 178 et 156 mètres carrés, de hauteur égale à $5^{m},40$;

3° Une chambre froide, à des températures comprises entre + 2 et + 4 degrés, de surface de sol égale à 800 mètres carrés, de hauteur égale à $3^{m},50$.

Dans ces chambres on doit introduire journellement 25.000 kilogrammes de viande fraîche.

4° Un local pour salaisons de 60 mètres carrés de superficie, à des températures comprises entre + 6 et + 8 degrés, de hauteur égale à 3^{m},50.

b. *Pour la viande chevaline :*

1° Une antichambre froide de 26 mètres carrés de superficie, à des températures comprises entre + 6 et + 8 degrés, de hauteur égale à 5^{m},40;

2° Une chambre froide de 32 mètres carrés de superficie, à des températures comprises entre + 2 et + 4 degrés, de hauteur égale à 3^{m},50.

Dans ces chambres on doit introduire journellement 1.500 kilogrammes de viande.

c. *Locaux pour viandes malsaines ou douteuses.*

1° Un local pour viandes malades, de 32 mètres carrés de superficie, à des températures comprises entre + 2 et + 4 degrés, de hauteur égale à 3^{m},50 ;

2° Un local pour viandes douteuses de 31 mètres carrés de superficie, à des températures comprises entre + 2 et + 4 degrés, de hauteur égale à 5^{m},40 ;

3° Deux locaux pour viande chevaline, d'une superficie égale à 7 mètres carrés, à des températures de + 6 à + 8 degrés, de hauteur égale à 3^{m},50.

d. *Chambre spéciale pour marchandises mises sous scellés* de 33 mètres carrés de superficie, à une température de + 2 à + 4 degrés, hauteur égale à 3^{m},50.

e. *Chambres de congélation.*

1° Chambre à viande, de 177 mètres carrés de

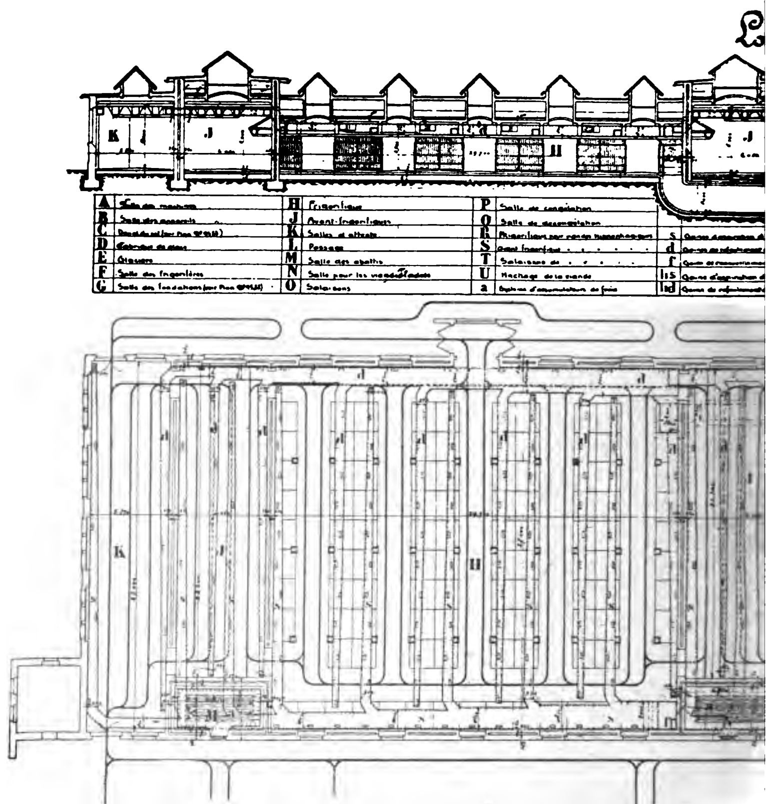
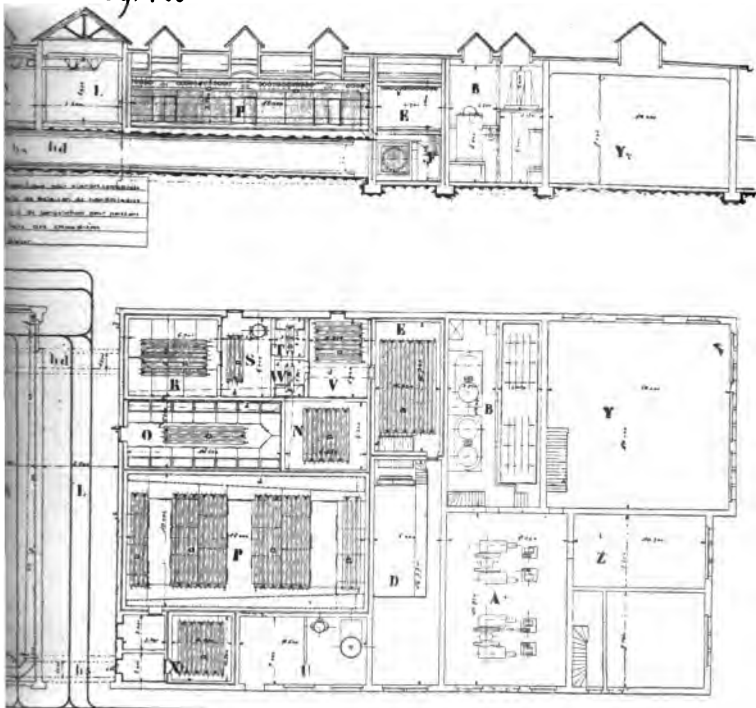


Fig. 100. — Entrepôt frigorifique de Berne construit par la Société Gene
Plan général du frigo

superficie, à des températures comprise entre — 5 et — 7 degrés de hauteur égale à $3^{m},50$.

2° Chambre à poisson, de 10 mètres carrés de superficie.

totale : 109m,400



Cliché de la Société Genevoise, à Genève.

pour la construction d'appareils de physique et de mécanique, à Genève.
: (élévation et plan).

3° Chambre à volailles, de 16 mètres carrés de superficie, de température égale à — 5 ou — 7°.

f. *Production de glace.*

1° Bac à glace de 10 tonnes par jour, contenant 406 mouleaux pour blocs de 25 kilogrammes ;

2° Réserve de glace d'une surface de 50 mètres carrés, maintenue à — 2 degrés, hauteur égale à 3m,50.

g. *Le matériel frigorifique* comprend trois compresseurs horizontaux à acide carbonique de 65.000 frigories chacun (température de la saumure = — 5 degrés; température de l'eau de condensation = + 10 à l'entrée et + 25° à la sortie); chaque compresseur est commandé par un moteur électrique (transmission par courroies avec enrouleur intercalé). Chaque compresseur est avec bâti à glissière double, cylindre en fonte, soupape en bronze, piston avec segments en fonte spéciale, clapets en acier, garniture métallique du presse-étoupes; il possède une soupape de sûreté munie d'un dispositif de déchargement de l'acide carbonique dans la tuyauterie d'aspiration sans aucune perte à l'extérieur. Les condenseurs sont à ruissellement et comportent chacun un refroidisseur de liquide; installés dans l'intérieur des locaux, il sont soumis à l'action d'un puissant ventilateur. Les évaporateurs sont placés chacun dans une cuve cylindrique avec dispositif d'agitation.

La saumure aspirée par des pompes est envoyée, soit dans le bac de fabrication de la glace, soit dans les tuyauteries de refroidissement des chambres, soit dans les frigorifères à ruissellement.

h. La production de l'air froid sec pour le *refroidissement des locaux* est réalisée au moyen de

frigorifères à ruissellement, composés de batteries de tôles verticales, sur lesquelles la saumure se déverse de collecteurs spécialement disposés. Ces frigorifères sont contenus dans une enveloppe en béton armé soigneusement isolée. La circulation de l'air dans les frigorifères et dans les chambres est assurée au moyen de ventilateurs à turbine. Afin de régler en même temps que la température l'état hygrométrique de l'air, un système pour le réchauffement de ce dernier a été disposé à la sortie du frigorifère.

Tous les locaux qui n'exigent pas une dessiccation spéciale de l'air sont refroidis par des batteries de tuyaux de grand diamètre formant accumulateurs de froid.

Pour les locaux de congélation, la distribution du froid est assurée par des accumulateurs d'eau salée en même temps que par des frigorifères à air sec.

i. *L'isolation* des tuyauteries d'acide carbonique et d'eau salée est réalisée au moyen de briques de liège au brai.

Les murs, plafonds, planchers sont isolés au moyen de l'expansite.

k. *La dépense totale d'eau* est égale tout au plus à 15 mètres cubes à l'heure.

l. *La marche journalière* est de 22 heures en été.

m. *La puissance motrice* nécessitée par l'entraînement des trois compresseurs, des agitateurs de l'évaporateur et du bac à glace, des pompes à eau salée, des ventilateurs, des frigorifères, de l'hélice du bac à glace, du treuil électrique manœuvrant les rames de mouleaux du bac à glace, ne dépasse pas 78 kilowatts (106 chevaux).

 L. MARCHIS. — 19

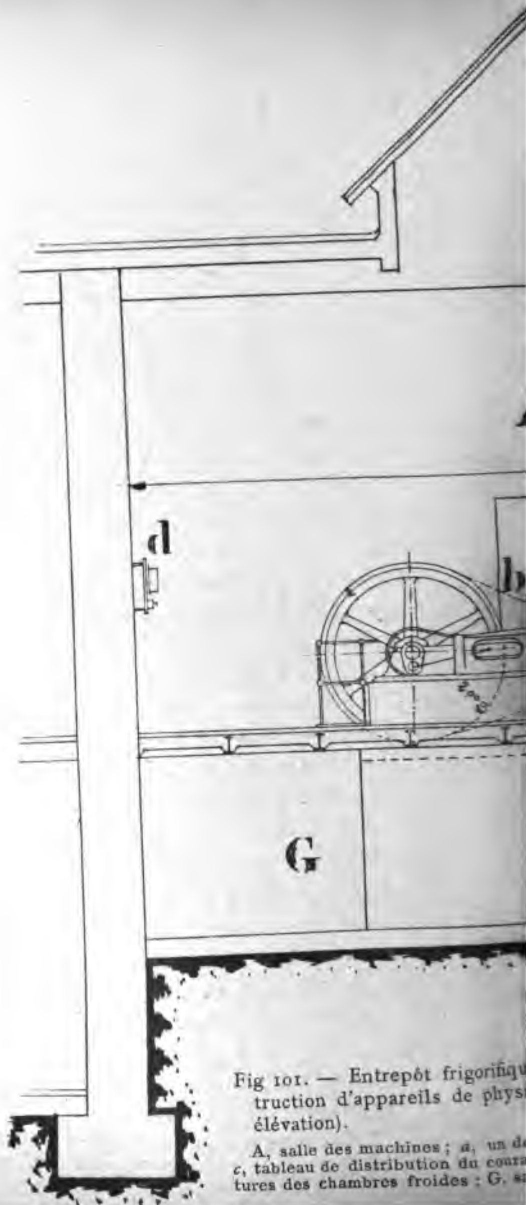
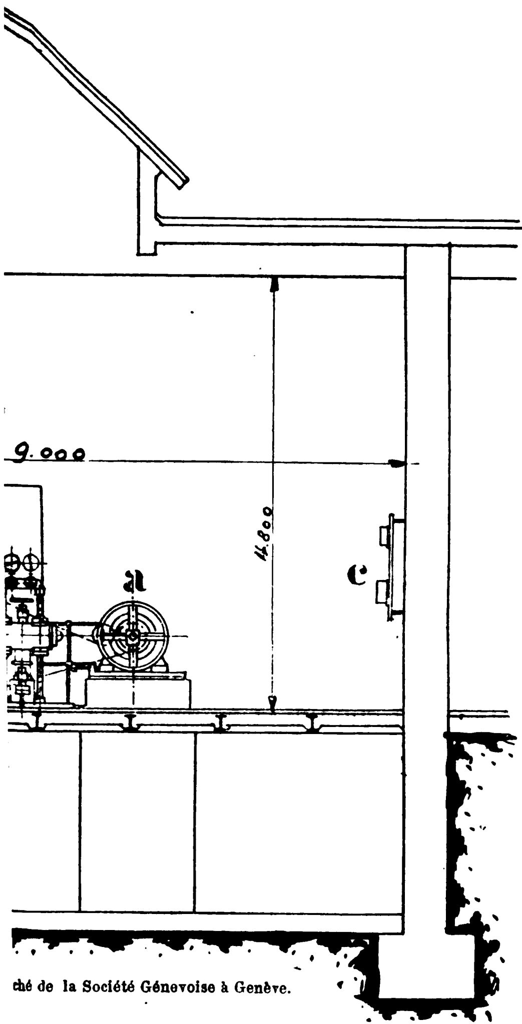


Fig 101. — Entrepôt frigorifiqu
truction d'appareils de phys
élévation).

A, salle des machines ; a, un d
c, tableau de distribution du coura
tures des chambres froides ; G, s



ché de la Société Génevoise à Genève.

Berne, construit par la Société Génevoise pour la cons-
et de mécanique à Genève. Salle des machines (vue en

urs électriques ; *b*, un des compresseurs à acide carbonique ;
trique ; *d*, thermomètre à distance pour connaître les tempéra-
fondations des compresseurs.

21. — Les frigorifiques d'abattoirs en France. — En *France*, il n'existe en 1916 que 11 frigorifiques d'abattoirs; parmi eux, se trouve le frigorifique de l'abattoir de la Villette à Paris, dans lequel il est interdit de conserver de la viande. Aujourd'hui un grand nombre de villes, qui reconstruisent les abattoirs, tendent à les doter de frigorifiques. Mais le mouvement en faveur de la réfrigération de la viande rencontre encore bien des résistances. Parmi les frigorifiques d'abattoirs les plus récemment installés, citons le frigorifique des abattoirs de Nancy (installé par la maison Fixary) et le frigorifique des abattoirs d'Orléans (installé par la maison Delaunay-Belleville).

22. — Le frigorifique d'abattoir français le plus récemment inauguré; frigorifique de l'abattoir d'Orléans. — Disons quelques mots de ce dernier frigorifique d'abattoir.

Il comprend :

a) Une antichambre froide de 14 × 8 mètres de superficie et de $3^m,20$ de hauteur ;

b) Une chambre froide de 26 × $12^m,50$ de superficie et de $3^m,20$ de hauteur.

Un sas d'air précède l'antichambre froide; sa hauteur est égale à $5^m,50$, à cause de l'installation de voies aériennes venant de l'abattoir.

La chambre froide est divisée en 52 cases grillagées de 2 mètres carrés en moyenne, garnies de barres à crochets.

L'isolation des deux chambres froides a été faite avec des plaques de liège aggloméré et imprégné de brai d'une épaisseur de 120 milli-

mètres pour les parois extérieures en contact avec l'atmosphère et de 80 millimètres pour le sol et les cloisons séparatives.

Des fenêtres et des lanterneaux garnis de verre Falconnier assurent l'éclairage des pièces.

La chambre froide ainsi que l'antichambre sont refroidies par circulation d'air froid. Cet air est refroidi dans un frigorifère à ruissellement placé au-dessus des chambres. [Surface des tôles à ruissellement = 250 mètres carrés]. Une pompe centrifuge d'un débit de 30.000 litres à l'heure aspire la saumure dans le réfrigérant de la machine frigorifique et la refoule sur le frigorifère. La circulation d'air au frigorifère et dans les chambres est assurée au moyen d'un ventilateur centrifuge d'un débit égal à 20.000 mètres cubes à l'heure. Enfin, on purifie l'air des chambres au moyen d'un ozoniseur que l'on fait fonctionner une fois par jour.

A ce frigorifique est annexée une fabrique de glace opaque prévue pour 16 tonnes par jour, mais produisant en moyenne 8 à 10 tonnes.

Les machines frigorifiques sont représentées par 2 compresseurs à ammoniaque Delaunay-Belleville de 65.000 frigories-heure chacun [alésage = 230 millimètres ; course = 500 millimètres ; nombre de tours par minute = 75].

Les condenseurs des machines frigorifiques sont à ruissellement [65 mètres carrés de surface d'échange pour chaque machine] ; ils sont suivis d'un refroidisseur d'ammoniaque liquide de 3 mètres carrés de surface. Les évaporateurs sont placés, l'un dans le bac à glace, l'autre dans un

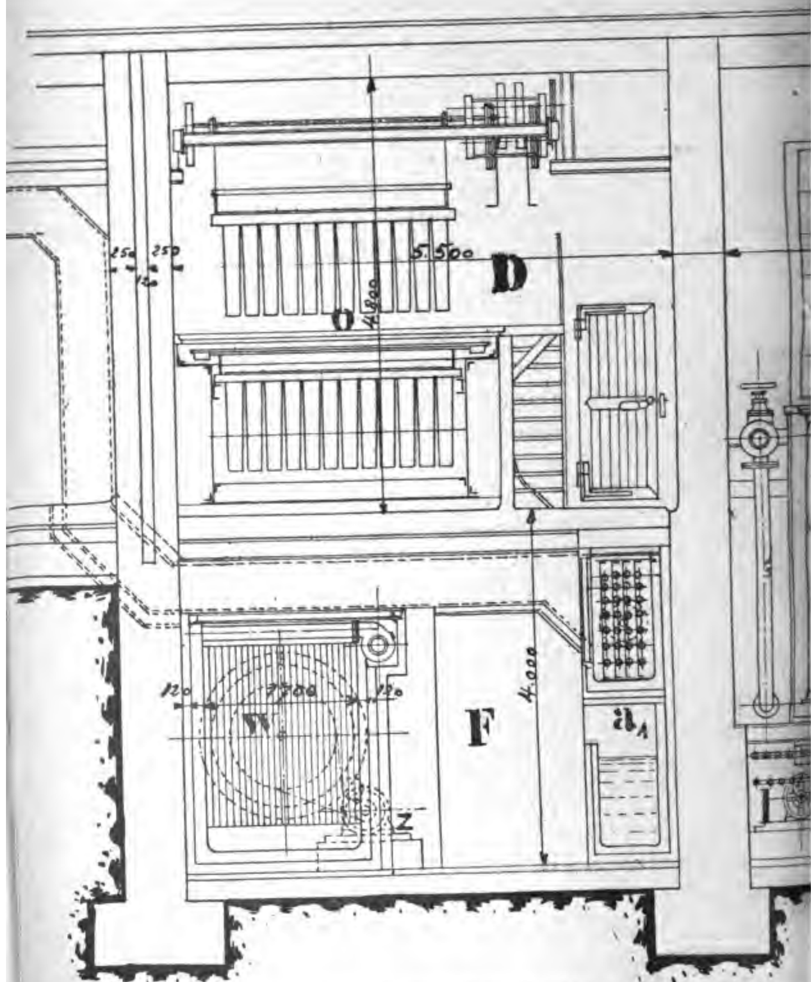
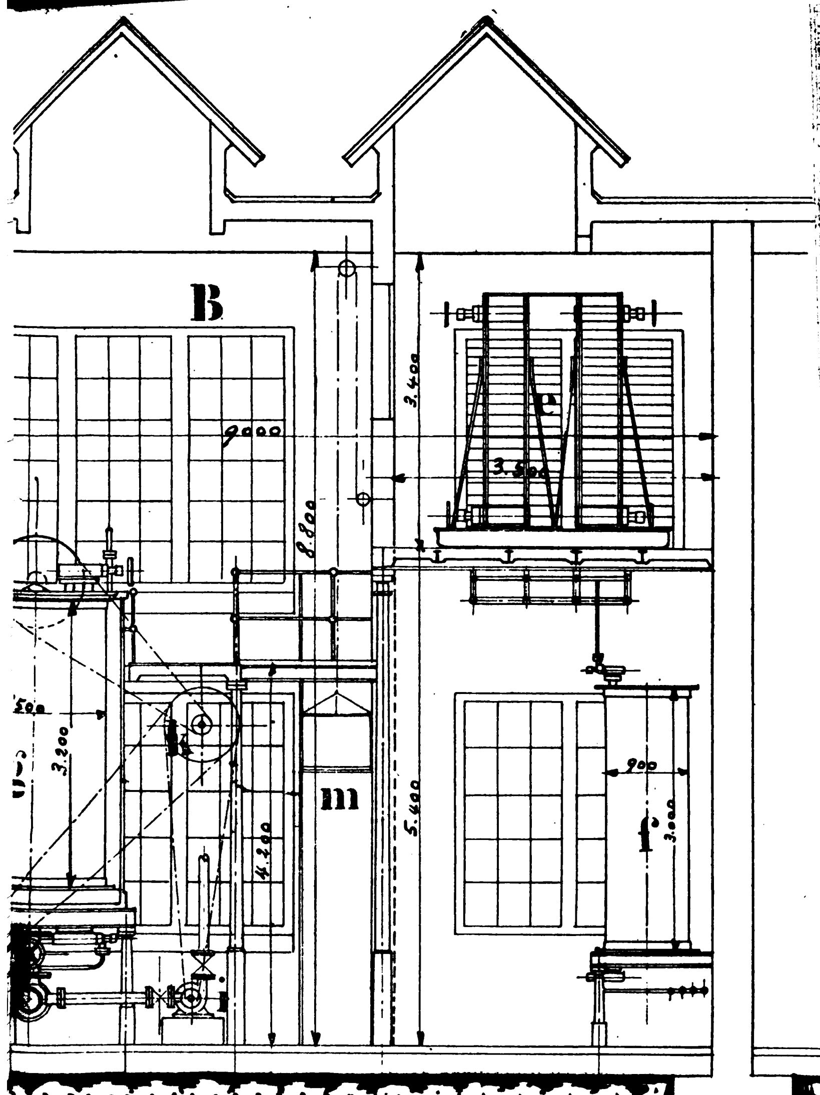


Fig. 102. — Entrepôt frigorifique de Berne, construit par la Société
Salles des condenseurs et évaporateurs d

B. *Salle des condenseurs et évaporateurs.* — *v*, condenseurs ou liquéfacteurs à m
rateurs ; *h*, pompes d'eau douce ; *i*, pompes d'eau salée ; *k*, transmission ; *l*, moteu
D. *Fabrique de glace.* — O, bac générateur de glace avec rangée de mouleaux



Cliché de la Société Genevoise à Genève.

evoise pour la construction d'appareils de physique et de mécanique.
à glace, des frigorifères. Vue en élévation.

ment ; *f*, refroidisseurs du liquide frigorigène avant la vanne de régulation ; *g*, évapo-
ique ; *m*, monte-charge du sel.

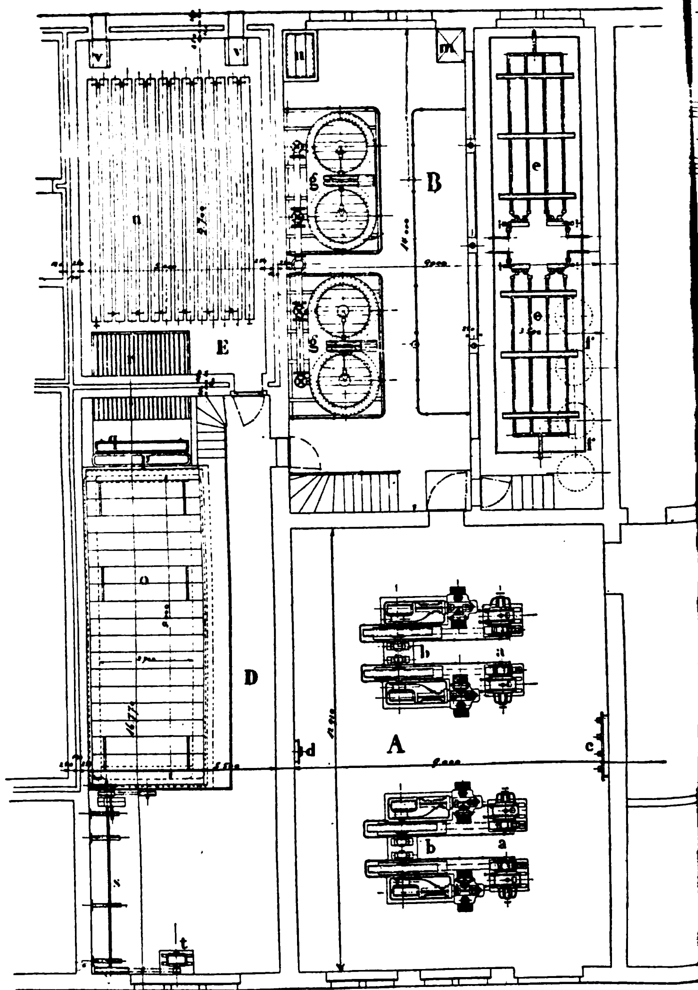
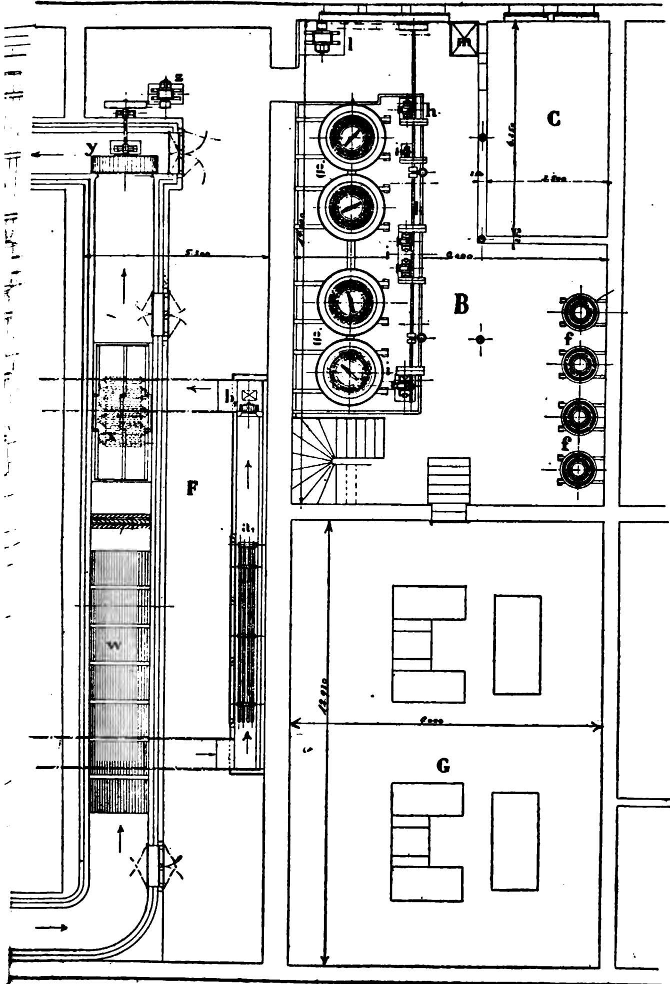


Fig. 103. — Entrepôt frigorifique de Berne construit par la Société Genévo
Vue en plan des salles des machines, des condenseurs et évap

A. *Salle des machines.* — *a*, moteurs électriques ; *b*, compresseurs à acide car
B. *Salle des appareils.* — *e*, condenseurs à ruissellement ; *f*, refroidisseurs
douce ; *i*, pompes d'eau salée ; *k*, transmission ; *l*, moteur électrique ; *m*, mon
C. *Dépôt du sel.*
D. *Fabrique de glace.* — *o*, bac générateur de glace ; *p*, bac de démoulage
; *t*, moteur électrique.
lacière. — *u*, système réfrigérant ; *v*, appareils pour recevoir les blocs
lle des frigorifères. — *w*, frigorifère sec ou à tuyaux pour les chambres
frigorifère sec ou à tuyaux pour les chambres de congélation ; *b*, ventil
lle des fondations des



Cliché de la Société Génevoise, à Genève.

· la construction des appareils de physique et de mécanique, à Genève.
;urs, du bac à glace, de la réserve de [glace, des frigorifères.

te; *c*, tableau de distribution électrique ; *d*, thermomètres à distance.
ide frigorigène avant la vanne de régulation ; *g*, évaporateurs; *h*, pompes d'eau
rge du sel; *n*, doseur du sel.

culeur pour les mouleaux; *r*, plan incliné, recette des blocs de glace; *s*, trans-

».

gération ; *x*, calorifère pour la marche hivernale ; *y*, ventilateur; *z*, moteur électri-
: electrique.

bac à saumure (surface des serpentins = 75 mètres carrés pour chacun d'eux).

La force motrice est fournie par deux moteurs à gaz pauvre de 60-65 chevaux. Un moteur électrique de 68 chevaux, alimenté par le secteur de la ville, est prévu comme secours. Une dynamo (15 ampères, 220 volts) fournit le courant nécessaire à l'éclairage de l'usine[1].

1. De Chessin. *L'installation frigorifique de l'abattoir municipal d'Orléans.* (L'industrie frigorifique, 10e année, no 110, juillet 1912).



CHAPITRE IX

LA CONSERVATION DU POISSON ET LES FRIGORIFIQUES DE PÊCHE.

1. — Poisson réfrigéré et poisson congelé. — Le poisson peut être conservé, soit à l'état *réfrigéré*, soit à *l'état congelé*.

Le poisson *réfrigéré* est du poisson conservé à une température voisine de 0° C. plus exactement entre — 1° et + 2° C.

Le poisson *congelé* est du poisson solidifié et maintenu à une température voisine de — 7° C.

2. — La réfrigération du poisson au moyen de la glace. — Actuellement la réfrigération du poisson se fait par le contact de la glace concassée en morceaux aussi petits que possible. Sur les bateaux de pêche la pratique généralement employée est la suivante. Le bateau est approvisionné, avant le départ, d'une quantité de glace variant de 5 à 50 tonnes environ, suivant la dimension du chalutier, l'éloignement du lieu de pêche et l'époque de l'année. La cale à poisson est isolée et divisée en compartiments munis de rayons mobiles. Dès que le poisson est pris et nettoyé, on étend sur le premier rayon une cou-

che de glace concassée sur laquelle est placé le poisson en trois ou quatre rangs de hauteur. Un autre rayon, reposant sur supports (en vue d'éviter le tassement du poisson étalé au-dessous) est à nouveau installé et pourvu d'un lit de glace et de poissons.

Arrivé à terre, le poisson est séparé de la glace, de nouveau trié, lavé et replacé entre des couches de glace, afin de pouvoir être transporté.

Grâce à cette méthode, le poisson peut être conservé en bonne condition pendant dix à dix-neuf jours environ, suivant la saison, la capacité et l'aménagement des cales utilisées.

Toutefois, des précautions sont nécessaires afin, d'une part d'empêcher les arêtes vives des morceaux de glace de déchirer l'épiderme du poisson, et d'autre part d'éviter une trop grande fusion de la glace; l'eau provenant de cette fusion a en effet l'inconvénient de délaver le poisson qui perd ainsi une partie de ses qualités commerciales et même nutritives.

Aussi pour éviter ces inconvénients, a-t-on proposé d'abord de substituer à la glace concassée de la neige artificielle obtenue par le broyage mécanique convenable des blocs de glace. Cette neige, outre qu'elle fond moins vite que la glace, présente les avantages de ne pas abîmer le poisson, et d'empêcher le contact de l'air extérieur.

3. — Chambres frigorifiques à bord des chalutiers. Conservation du poisson au contact de glace maintenue au voisinage de zéro. — On est allé plus loin. On a

fait à bord de certains chalutiers des installations frigorifiques, destinées à maintenir la glacière et la cale au poisson à une température comprise entre 0° et + 2° C ; ces conditions sont suffisantes pour diminuer considérablement la fusion de la glace. On emploie à cet effet une circulation d'air froid, l'eau provenant de la légère fusion de la glace empêchant les effets nuisibles de dessiccation de l'air froid sur la chair du poisson, en le conservant humide et propre à la fois. C'est grâce à ce procédé que la *Société des Pêcheries du Golfe de Gascogne*, en portant à vingt jours le délai de conservation du poisson, a pu atteindre des régions de pêche jamais explorées, et en rapporter des poissons dont l'œil brillant, l'écaille luisante, la couleur intacte attestaient l'état de fraîcheur.

4. — Caractéristiques d'une installation frigorifique à bord d'un chalutier. — La société *Dyle et Bacalan*, qui a étudié avec soin ce mode d'installation à bord des chalutiers, admet les caractéristiques suivantes pour un chalutier qui peut avoir à mettre en cale 10 à 12 tonnes de poisson en vingt-quatre heures [1].

Puissance frigorifique de la machine : au moins égale à 15.000 frigories-heure.

Surface d'échange entre l'agent frigorifique et l'air extérieur : 180 à 200 mètres carrés, soit en tuyauterie de 60 millimètres de diamètre exté-

1. De Goer de Hervé. *Les applications du froid à la pêche maritime.* (L'industrie frigorifique, 9e année, n° 92, janvier 1911).

rieur, une longueur de 1.000 mètres environ.

L'installation doit être pourvue d'un dispositif de dégivrage permettant de faire écouler l'eau de mer dans la tuyauterie de réfrigération au lieu et place de la saumure.

Une telle installation de 15.000 frigories (machine verticale à acide carbonique) peut être effectuée dans un espace de $1^m,50$ sur $1^m,80$ de base avec $2^m,30$ de hauteur; sa place est dans la chambre des machines.

Pour un chalutier de 40 mètres, le prix de cette installation frigorifique n'est pas inférieur à 20.000 francs. Cependant si on compte que la quantité de glace à emporter sera au moins réduite de moitié, on peut, par l'installation de la machine frigorifique, réaliser une économie annuelle notable.

5. — **Entrepôt frigorifique à terre pour la conservation du poisson réfrigéré.** — Le transport du poisson depuis le quai jusqu'à la halle, depuis la halle jusqu'au magasin du mareyeur et de ce magasin à la gare de départ, entraîne une dépréciation énorme du poisson, une grosse perte de temps et des frais généraux considérables. Aussi a-t-on pensé à installer au voisinage même du quai de pêche un entrepôt frigorifique raccordé à la gare, dans lequel le poisson puisse séjourner quelques jours avant son départ vers les centres de consommation.

M. Cligny, directeur de la station aquicole de Boulogne-sur-Mer, a indiqué les caractéristiques

d'un tel entrepôt; nous allons suivre ici ses indications[1].

Supposons un port de pêche de moyenne importance, ayant une flotte de 15 à 16 chalutiers représentant dans leur ensemble une dizaine d'arrivages par semaine. Les vapeurs modernes peuvent rapporter 20 à 25 tonnes de poisson frais par voyage; mais ce sont là des chiffres qui correspondent à des circonstances particulièrement favorables; il faut simplement compter sur un arrivage par semaine de 150 à 200 tonnes de poisson. Cette pêche se répartit sur quatre jours de marché et représente chaque fois une manipulation de 40 à 50 tonnes de poisson. Supposons que les 50 tonnes de poisson entrent dans le frigorifique pour les manipulations (nettoyage, triage, emballage, réfrigération), et que, dans certaines circonstances, une égale quantité de poisson reste entreposée plus de vingt-quatre heures. Il faut donc construire un frigorifique pouvant contenir 100 tonnes de poisson.

Comptons une capacité utile de 1 mètre cube par 500 kilogrammes de poisson entreposé. Il faut donc un entrepôt ayant un cube utile de 200 mètres cubes. Ce sera, par exemple, un bâtiment présentant 30 mètres carrés de surface couverte avec deux étages de $3^{m},50$ de hauteur; il sera surmonté d'un comble isolé thermiquement et dans lequel on pourra installer un frigorifère servant au refroidissement de l'air, si on utilise

1. A. Cligny. *Les frigorifiques de pêche.* (L'industrie frigorifique, 8e année, no 84, mai 1910).

dans les chambres un courant d'air froid[1]. Avec ce comble, et en calculant largement, on peut compter sur un cube d'entrepôt égal à 300 mètres cubes environ.

Le poisson du chalutier est séparé de sa glace au moment du débarquement ; il est trié, lavé, étalé, longuement transporté sans glace ; toutes ces manipulations le ramènent à la température de 12 à 15° C. Il faut donc compter sur une rentrée quotidienne de 30 tonnes de poisson, que l'on doit ramener de 15° à la température de zéro. Si l'on admet que la chaleur spécifique du poisson est égale à l'unité, il faut produire de ce chef par vingt-quatre heures 450.000 frigories.

Mais d'autre part, il faut maintenir à zéro l'air de l'entrepôt et le poisson qui s'y trouve entreposé, malgré les pertes de chaleur provenant de la conductibilité des parois, des allées et venues, des manipulations, ouverture des portes, etc... Admettons, en calculant largement, qu'il faille produire alors 250.000 frigories par vingt-quatre heures.

1. M. Cligny préconise pour la conservation du poisson un courant d'air sec et froid. « C'est, dit-il, le principe des sécheries de morues et notamment des techniques norwégiennes qui s'appliquent même aux produits salés. Quand on expose le poisson dans un courant d'air sec, il se produit une évaporation qui en abaisse la température, et la surface devenue sèche forme un substratum peu propre au développement des germes ou microbes ; en particulier, si le poisson n'a pas été meurtri ou lavé, il conserve son mucus naturel qui forme en séchant un glacis protecteur. » Il ne faudrait pas évidemment pousser trop loin la dessiccation, mais la dessiccation superficielle est un adjuvant énergique de la réfrigération. A une température convenable, le poisson se conservera mieux dans un air renouvelé, qui peut être rendu aseptique par barbottage dans la saumure froide, que dans l'air confiné.

Il convient donc de produire par vingt-quatre heures une totalité de 700.000 frigories, soit environ 30.000 frigories-heure. Telle est la puissance frigorifique du compresseur que l'on doit employer, si l'on effectue la réfrigération durant vingt-quatre heures. Ce mode de marche correspond à une puissance dépensée égale à 12 chevaux environ. Mais il est prudent de prévoir des arrêts intempestifs en employant deux compresseurs de 20.000 frigories-heure chacun, la puissance de chaque compresseur pouvant être poussée en cas de besoin à 25.000 frigories-heure. La puissance mécanique dépensée est alors répartie entre deux moteurs de 8 à 10 chevaux chacun.

La durée de la marche des machines pourra d'ailleurs être réduite quand les entrées seront nulles, notamment dans les fins de semaine où les arrivages sont insignifiants ou réduits à néant; dans ce cas, d'après M. Cligny, il suffira de marcher cinq à six heures par jour. Si les arrivages sont faibles, il suffira de marcher cinq heures, plus autant de fois trente minutes que l'on aura reçu de tonnes de poisson à 15°. En particulier on pourra stopper la machine durant la nuit chaque fois que les entrées n'auront pas dépassé une quinzaine de tonnes.

M. Cligny insiste avec raison sur la dépense d'eau au condenseur de la machine frigorifique. Elle peut être évaluée à 100 mètres cubes environ par vingt-quatre heures. Aussi a-t-on intérêt à placer l'entrepôt sur le quai, puisque l'eau de mer est gratuite et en quantité illimitée.

M. Cligny préconise avec raison, dans les entre-

pôts des grands ports de pêche où l'on manipule 3 à 400 tonnes de poisson par jour, l'adjonction à l'entrepôt d'une fabrique de glace permettant de produire, durant les périodes de calme dans la réfrigération, de la glace à bon marché.

6. — Réfrigération du poisson. Procédés employés par la Compagnie des Docks Frigorifiques de Bordeaux. — Comme exemple de conservation de poisson dans un entrepôt situé à terre, on peut citer le procédé employé par la *Compagnie des Docks Frigorifiques* de Bordeaux dans l'établissement qu'elle a installé sur les bords du bassin d'Arcachon[1]. Cet entrepôt comprend des salles de réfrigération et de congélation ; le froid est obtenu, soit à l'aide de circulation de saumure refroidie dans des radiateurs suspendus aux plafonds des salles, soit par la combinaison de la circulation de saumure avec un courant d'air froid.

Avant d'être mis en entrepôt, les poissons, lorsqu'ils sont retirés de la cale, sont vérifiés et triés, puis mis en caisse, entourés de toutes parts et séparés les uns des autres par une épaisse couche de glace finement broyée.

Chaque sorte de poisson demande une préparation spéciale, des précautions particulières. Les rougets, les grondins, les rascasses perdraient vite leur couleur rouge, si chaque poisson n'était soigneusement enfermé dans un papier spécial,

1. Delpon. *Le froid et l'industrie de la pêche*. Rapport présenté au premier Congrès français du froid, tenu à Lyon en octobre 1909.

dit papier sulfurisé. Les petits merlans, les maquereaux sont disposés en rangs serrés, la queue en bas, la gueule en haut grande ouverte. Les soles sont entassées à plat les unes sur les autres suivant leurs tailles, paire par paire et ventre contre ventre. Les turbots, les esturgeons, tous les poissons de taille exceptionnelle et de qualité rare sont installés dans des caisses spéciales. Quant aux raies, il n'est pas besoin de grandes précautions pour les conserver ; en effet, comme certains gibiers, elles ne sont appréciées que lorsqu'elles sont légèrement faisandées ; elles répandent alors une forte odeur d'ammoniaque qui est leur fumet particulier.

Les poissons sont le plus souvent vidés avant d'être emballés. Il faut éviter de faire des plaies étendues et notamment d'enlever les ouïes.

L'emballage étant terminé, les caisses, avec leur contenu de poisson et de glace sont immédiatement portées dans la chambre de réfrigération, maintenue à — 1° C., afin d'empêcher la fusion de la glace.

Le séjour de ces caisses dans la chambre de réfrigération est au plus de quelques jours, douze ou quinze au maximum. Lorsque le séjour doit être plus prolongé, la congélation est nécessaire.

7. — **Poisson congelé.** — La congélation du poisson est surtout pratiquée aux Etats-Unis. En Europe, le poisson congelé est déprécié sur les marchés (fig. 104).

On admet généralement que, la congélation doit être limitée aux poissons tels que le saumon,

l'anguille, le flétan ou halibut, etc., en raison de leur musculature plus ferme et du fort pourcentage de graisse dans leurs tissus.



Fig. 104. — Chambre de conservation du poisson congelé.

8. — **Pratique de la congélation du poisson. Procédé de la Compagnie des Docks Frigorifiques de Bordeaux.** — Cependant M. Delpon, au Congrès de Lyon, a fait une communication dans laquelle il dit avoir obtenu de très bons résultats en appliquant la congélation, même à des poissons à chair molle, tels que les merlus. Ceux-ci sont placés dans des caisses abondamment garnies de glace finement broyée, de manière à envelopper complètement chaque poisson. Les caisses sont placées dans une salle de congélation à la température de — 10° C. environ ; elles y sont laissées le temps nécessaire pour la solidification du tout

qui ne forme alors qu'un seul bloc. Une décongélation lente d'abord au contact de glace, puis dans un courant d'eau très fraîche conduit à un succès dans la conservation par la congélation. M. Delpon cite le cas d'une caisse de merlus congelés à cœur[1], expédiée enveloppée dans de la paille, après une station de quarante jours en salle frigorifique, par wagon ordinaire de Bordeaux à Genève (durée du trajet = trois jours environ) ; les poissons montrèrent l'aspect du poisson absolument frais (œil luisant, écailles luisantes, ouïes rouges), leur chair fut trouvée excellente. Quelques-uns de ces merlus, conservés dans de la glace finement broyée et fréquemment renouvelée, montrèrent l'œil terne ; mais la tête, ayant été coupée, on constata que leur chair était blanche, que le sang coulait rouge, que le poisson était bon pour la consommation, bien qu'ayant perdu un peu de sa valeur marchande. Cette expérience montre bien que le poisson, congelé puis décongelé avec des précautions suffisantes, n'est pas, comme on le prétend, plus apte aux altérations ultérieures[2].

9. — Pratique américaine de la congélation du poisson. — La pratique américaine de la congélation du poisson est la suivante.

1. M. Delpon est d'avis que le poisson ne doit pas être vidé, lorsqu'il doit être soumis à la congélation.

2. A l'entrepôt Vriessevem d'Amsterdam, on suspend d'abord les poissons à des crochets dans une chambre à — 20° C. Au bout de quatre à cinq jours, on le transporte dans un magasin de conservation à la température de — 10° C. Le refroidissement est fait par circulation d'air et l'état hygrométrique est maintenu entre 70 et 75 p. 100.

1° Le poisson est lavé avec le plus grand soin ;

2° Il est trié et placé dans les bassins où il sera congelé ; ces bassins peuvent porter des trous aux extrémités pour permettre l'écoulement de l'eau, ou avoir leur base pleine, de manière que l'eau restant avec le poisson soit congelée avec lui.

Suivant la nature des poissons, les uns sont introduits au congélateur fendus et vidés ; c'est le cas de la morue et du flétan. D'autres, comme le saumon et l'esturgeon, sont congelés sans être vidés.

Le mode d'arrimage du poisson dans les bassins a une très grande importance au point de vue de la conservation du poisson et de son aspect après la congélation. C'est ainsi que tous les poissons, fendus et vidés avant la congélation, sont arrimés dans les bassins le ventre en bas, afin que l'eau puisse rapidement s'écouler de la cavité stomacale. Certains poissons non vidés sont souvent enveloppés dans un papier spécial.

Dans tous les cas, il est important que le poisson soit arrimé de manière à constituer un paquet bien compact remplissant le bassin aussi complètement que possible.

3° La chambre de congélation est portée à une température de — 15° à — 20° C., suffisante pour que le poisson soit congelé à cœur au bout de vingt-quatre heures.

4° Les bassins passent alors dans la chambre d'enrobage ; ils y sont plongés dans l'eau à une température supérieure à 0° C. Le bloc de poisson solide est alors détaché du bassin, puis

plongé dans l'eau à 0°. Il se forme dans ces conditions autour du bloc de poisson une carapace de glace.

5° Enfin, le poisson arrimé dans des caisses refroidies est placé dans la chambre de conservation à une température de — 7° C. environ (fig. 104).

Dans le but d'éviter l'évaporation trop rapide de la carapace de glace, on refroidit la chambre de conservation au moyen de tuyaux placés au plafond sans circulation artificielle de l'air.

Avec un bon enrobage du poisson, enrobage que l'on doit renouveler tous les deux ou trois mois, on arrive à conserver le poisson congelé en bon état durant neuf ou dix mois. Au delà de cette limite, le poisson perd de sa qualité au point de vue du goût et de l'aspect, par suite de la transformation des huiles du poisson.

10. — L'installation de la Canadian Fishing C° pour la congélation du flétan ou halibut. — Comme exemple d'installation américaine pour la congélation du poisson, décrivons l'installation faite à Vancouver pour la *Canadian Fisching C°* pour la congélation du *flétan* (en anglais *halibut*)[1].

Cet établissement est installé pour traiter à la fois 150 à 175 tonnes de poisson. Il se compose d'un batîment à trois étages, ayant 56 mètres de long sur 34 mètres de large, bâti sur pilotis ; les parois sont en sapin de la Colombie anglaise ; le toit est en fer gaufré et galvanisé ; l'isolement des

1. *The Refrigeration of Halibut.* (Ice and Refrigeration, t. 42, n° 2, 1er février 1912).

parois est assuré par des copeaux de liège. Le navire qui amène le poisson peut accoster d'un côté de l'entrepôt tandis que sur une autre face celui-ci est relié au Canadian Pacific Railway C°.

Le flétan, amené par les bateaux, est décapité, complètement nettoyé, lavé, et enfin introduit dans les congélateurs, qui se trouvent au même étage que le quai de débarquement. L'usine possède 5 congélateurs, dont chacun a 11^{m},40 de long ; 4^{m},20 de large ; 2^{m},55 de hauteur. Chaque congélateur comporte une allée centrale ; de chaque côté les tuyaux de réfrigération disposés en profondeur sur 4 rangées forment 8 étagères, sur lesquelles on place directement le poisson qui doit être congelé[1]. Les tuyaux à détente directe, avec un diamètre extérieur de 25 millimètres, sont disposés en serpentins présentant, dans leurs parties droites, une longueur de 11 mètres environ ; soit, pour chaque serpentin à 8 parties droites disposées en hauteur, une longueur de 92^{m},50

1. Un dispositif analogue a été employé par la Société du froid industriel à Paris, pour l'installation d'une petite chambre de congélation à bord d'un chalutier. L'installation comprend une chambre à 0° C. où les poissons sont entassés au fur et à mesure de la pêche et une chambre à — 7° C. où ils sont conservés à l'état de congélation. La réfrigération se fait à détente directe.

Dans une autre installation faite également à bord d'un bateau de pêche par la même Société, la machine frigorifique de 6.000 frigories-heure (compresseur vertical à CO^2) commandée par un moteur Dan à pétrole lampant, refroidit par circulation de saumure une chambre de congélation de 1350 × 900 × 1700 millimètres et une chambre de conservation de 2200 × 900 × 1700 millimètres ; elle actionne en même temps une fabrique de glace d'environ 30 kilogrammes à l'heure.

(E. Menalque. *Installations frigorifiques à bord de bateaux de pêche*, *L'industrie frigorifique*, 9e année, n° 95, avril 1911).

environ (en comptant les coudes). Chaque congélateur comprenant 8 de ces serpentins juxtaposés en 2 groupes de 4 sur chaque paroi, est donc tapissé de $92,50 \times 8 = 740$ mètres de tuyaux, soit 21 mètres de tuyaux environ par tonne de poisson (contenance de la chambre : 35 tonnes de poisson) ou 50 kilogrammes de poisson environ par mètre de tuyaux.

Les séries de tuyaux de réfrigération sont branchés sur un accumulateur frigorifique commun à tous les congélateurs ; cet accumulateur en fer a $1^m,80$ de hauteur pour 75 centimètres de diamètre.

Dans les congélateurs, le poisson reste de douze à trente-six heures, suivant son aspect, la température étant de — 23° à — 30° C.

Après avoir été congelés à cœur, les poissons sont portés au glaçage et à la chambre d'emballage. Là ils sont placés sur des claies par lots de 150 à 250 kilogrammes et immergés dans de l'eau aux environs de 0° C. Au sortir de cette eau, les poissons sont entourés de glace ; l'opération est renouvelée deux fois.

La chambre de glaçage a $11^m,60$ de largeur $18^m,50$ de longueur et $2^m,55$ de hauteur, soit un volume de 547 mètres cubes. Elle est refroidie par 792 mètres de tuyaux de 50 millimètres de diamètre extérieur, dans lesquels circule de l'ammoniaque liquide, soit $1^m,45$ de tuyaux par mètre cube de la chambre.

Après ce glaçage, les poissons sont emballés dans du papier parchemin, puis dans du gros papier d'emballage, enfin dans des boîtes garnies

intérieurement de ce même papier. Ces caisses sont alors placées dans des magasins de conservation à la température de — 12° C. Ceux-ci sont placés aux 2e et 3e étages de l'entrepôt. Lorsque le magasinage ne doit pas dépasser deux ou trois mois, les poissons munis de leur double enveloppe de papier sont simplement arrimés en vrac dans les magasins de conservation. Dans les caisses on peut les conserver jusqu'à sept mois ; mais au bout de ce temps, le poisson a besoin d'être glacé de nouveau et réempaqueté.

Il y a 12 de ces chambres de conservation refroidies par des tuyaux de 50 millimètres de diamètre extérieur, dans lesquels circule de l'ammoniaque liquide ; la longueur totale de ces tuyaux est égale à 660 mètres environ dans les plus grandes et à 225 mètres dans les plus petites.

A cette usine de conservation de poisson est adjointe une fabrique de glace de 40 tonnes par vingt-quatre heures en mouleaux de 150 kilogrammes environ chacun. Cette glace qui peut être conservée dans deux magasins refroidis est employée sur les navires de pêche pour la conservation du poisson.

Le poisson est expédié vers l'intérieur des États-Unis dans des caisses en bois de pin ayant $1^m,10$ de longueur ; $0^m,575$ de largeur ; $0^m,410$ de hauteur ; elles contiennent environ 200 kilogrammes de poisson chacune. L'emballage se fait en alternant des couches de poisson enrobé et empaqueté et de glace finement broyée : la caisse pleine de glace et de poisson pèse environ 400 kilo-

grammes. Ces caisses sont placées dans des wagons refroidis par de la glace ; elles sont entourées elles-mêmes de glace pilée. Ces wagons font en six jours le trajet de Vancouver à Boston, avec un seul renouvellement de glace en route durant la saison chaude.

L'usine de préparation du poisson est refroidie par 4 machines Triumph ayant chacune une puissance frigorifique de 21 tonnes de glace par vingt-quatre heures, soit en tout une puissance de 84 tonnes par vingt-quatre heures. Ces 4 compresseurs sont divisés en deux groupes, dont chacun est commandé électriquement ; l'un de ces groupes commande les congélateurs, tandis que l'autre refroidit les bacs à glace, les chambres de conservation, les chambres de glaçage, etc...



TABLE DES FIGURES

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

L'APPLICATION CORRECTE DU FROID A LA CONSERVATION DES DENRÉES PÉRISSABLES

CHAPITRE PREMIER

LA MACHINE FRIGORIFIQUE A COMPRESSION

§ 1. — Puissance frigorifique et rendement.

CHAPITRE IV

LES ISOLANTS THERMIQUES

CHAPITRE V

CONSTRUCTION ET AMÉNAGEMENT D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

§ 1. — Mode de construction et d'isolement de l'édifice.

§ 2. — Le refroidissement des chambres de conservation

CHAPITRE VI

LES ENTREPOTS FRIGORIFIQUES

§ 1. — Le fonctionnement d'un entrepôt frigorifique pour toutes denrées.

§ 2. — Les entrepôts frigorifiques dans les divers pays.

CHAPITRE VII

LA GLACE ARTIFICIELLE

CHAPITRE VIII

LA CONSERVATION DE LA VIANDE ET LES FRIGORIFIQUES D'ABATTOIRS

CHAPITRE IX

LA CONSERVATION DU POISSON ET LES FRIGORIFIQUES DE PÊCHE

ÉVREUX, IMPRIMERIE CH. HÉRISSEY, PAUL HÉRISSEY, SUCC^r



